

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Marcio Lima Rios

**SOLOS CARBONÁTICOS E INTERAÇÕES PEDOGEOMORFOLÓGICAS NO  
SEMIÁRIDO BAIANO: da evolução da paisagem ao processo de desertificação.**

Belo Horizonte  
2021

Marcio Lima Rios

**SOLOS CARBONÁTICOS E INTERAÇÕES PEDOGEOMORFOLÓGICAS NO SEMIÁRIDO BAIANO: da evolução da paisagem ao processo de desertificação.**

**Versão final**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientador: Dr. Fábio Soares de Oliveira

Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Vilma Lúcia Macagnan  
Carvalho

Belo Horizonte  
2021

R586s  
2021

Rios, Marcio Lima.

Solos carbonáticos e interações pedogeomorfológicas no semiárido baiano [manuscrito] : da evolução da paisagem ao processo de desertificação / Marcio Lima Rios. – 2021.

252 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Fábio Soares de Oliveira.

Coorientadora: Vilma Lúcia Macagnan Carvalho.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2021.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 207-236.

Inclui apêndices.

1. Desertificação – Teses. 2. Solos – Erosão – Teses. 3. Solos – Formação – Teses. I. Oliveira, Fábio soares de. II. Carvalho, Vilma Lúcia Macagnan. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. IV. Título.

CDU: 551.435



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

### **FOLHA DE APROVAÇÃO**

***SOLOS CARBONÁTICOS E INTERAÇÕES PEDOGEOMORFOLÓGICAS NO SEMIÁRIDO BAIANO:  
DA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM AO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO***

**MARCIO LIMA RIOS**

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **26 de agosto de 2021**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer**

UFV

**Grace Bungenstab Alves**

UFBA

**Caroline Delpupo Souza**

IFMG

**Vilma Lúcia Macagnan Carvalho**

IGC/UFMG

**Roberto Célio Valadão**

IGC/UFMG

**Fábio Soares de Oliveira** - Orientador

IGC/UFMG

Belo Horizonte, 26 de agosto de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Celio Valadao, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2021, às 18:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caroline Delpupo Souza, Usuário Externo**, em 27/08/2021, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Grace Bungenstab Alves, Usuário Externo**, em 30/08/2021, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vilma Lucia Macagnan Carvalho, Diretor(a) de unidade**, em 06/09/2021, às 12:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer, Usuário Externo**, em 09/09/2021, às 14:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0886070** e o código CRC **01ADB69B**.

## AGRADECIMENTOS

Após quase 20 anos da conclusão de minha graduação estou efetivamente realizando um sonho profissional e pessoal. Demorou, mas consegui. Este doutorado não apenas celebra quatro anos de intenso estudo, mas toda minha trajetória acadêmica e profissional dedicada à ciência geográfica e à licenciatura. Este trecho da tese é absolutamente importante, porque é aqui que eu posso livremente agradecer a todos que colaboraram direta ou indiretamente para uma conquista que sei que não é apenas minha, mas de toda uma família. Agradecimentos especiais à minha esposa, Aline Novais, que sempre, sempre... Esteve ao meu lado, em todas as decisões e soluções, bem como ao meu único filho, Gabriel Novais Rios, que foi fundamental ao pleno equilíbrio construído, entre o prazer do estudo e os prazeres efetivamente valiosos da vida.

Agradeço aos meus pais, Pedro e Maria, a quem dedico este trabalho pelo cuidado e pelos constates ensinamentos. À Barbara, Reginaldo, Moab, Heide e Patrícia por dividirmos as angústias durante o período mais crítico desta tese, a pandemia da COVID-19. À Zacarias, pelo exemplo intelectual, e pelos ótimos conselhos.

Tenho enorme gratidão à minha coorientadora, Professora Vilma, pelo protagonismo neste meu doutorado, desde a abertura das portas do IGC/UFGM, passando pela construção das primeiras ideias da tese, até o carinhoso apoio à minha família em Belo Horizonte. Ao meu orientador, Professor Fábio, pelas conversas, pelo apoio na estruturação científica das ideias, pelo suporte metodológico e técnico, além de muitos e muitos detalhes na tese.

Agradeço ao Sr. Zito, Sra. Gisélia, Sra. Balbina e Sr. Félix das comunidades rurais de Lagoa Branca e Taboa no município de Campo Formoso-Bahia, por gentilmente permitirem o desenvolvimento das atividades de campo em suas propriedades, além do apoio logístico. Também muito grato ao fundamental apoio do professor Enisvaldo Carvalho (IF Baiano) que me substituiu como professor no *Campus* Senhor do Bonfim, nos seis primeiros meses do doutorado. Não poderia esquecer dos amigos Cantídio e Gláucia pela mineiríssima hospitalidade e atenção, e pelo apoio nas estadias em Belo Horizonte.

Agradeço também aos amigos, pesquisadores, técnicos e professores que contribuíram direta ou indiretamente em importantes definições, interpretações, técnicas e métodos, que ajudaram a construir o presente trabalho: Prof. Dr. Vagson Carvalho (UFV); Prof. Dr. Alisson Jadavi (IF Baiano); Prof. Dr. Paulo Fernandes (UNEB/Campus-IV); Prof. Dr. Marcos Paulo (UNEB/Campus IV); Prof. Dr. Daniel de Sousa (UNIVASF); Prof. Dr. Delfran Batista (IF Baiano); Prof<sup>a</sup> Dra. Cristiane Oliveira (UFGM); Prof. Dr. Roberto Valadão (UFGM); Prof<sup>a</sup>. Dra. Caroline Delpupo (IFMG); Prof<sup>a</sup>. Dra. Grace Bungenstab (UFBA); Prof. Dr. Carlos Schaefer (UFV); Me. Fernando César (Técnico em Laboratório da UFGM); Sr. Venâncio Pereira (Técnico Agrimensor); Sr. Bruno Conti (Técnico Agrimensor); Me. Augusto Almeida (GeoCampus); e os pesquisadores Dr. Augusto Auler (Carste - Ciência e Meio Ambiente); e Dra. Mariana de Resende Machado.

Institucionalmente agradeço ao Instituto Federal Baiano, em particular ao *Campus* Senhor do Bonfim pelo fundamental afastamento remunerado das atividades profissionais; e à Universidade Federal de Minas Gerais, especialmente ao programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências, pela grandiosa oportunidade.

Encerro meus agradecimentos frisando a presença, em minha vida, do ensino público brasileiro, desde os primeiros passos no ensino fundamental e médio no município de Serrolândia-Bahia, à graduação em Geografia na Universidade do Estado da Bahia no município de Jacobina-Bahia, até o mestrado e doutorado na UFGM, em Belo Horizonte-MG.

*“É preciso lembrar que ninguém escolhe o ventre, a localização geográfica, a condição socioeconômica e a condição cultural para nascer. Nasce onde o acaso determinar. Por isso, temos que cuidar de todos aqueles que estão em todos os recantos deste planeta”.*

Aziz Ab'Saber.

## RESUMO

Na bacia hidrográfica do Rio Salitre, no norte da Bahia, as interações entre clima semiárido e solos com horizontes cálcicos e calcretes, impõem condições naturais peculiares na composição da paisagem. Este estudo relaciona materiais e processos, principalmente associados à calcificação em solos, dinâmica e evolução de vertentes e desertificação, analisados a partir de elementos que se interrelacionam em diferentes escalas espaciais. O objetivo é compreender a dinâmica evolutiva e os atributos dos solos carbonáticos e sua interação com a morfodinâmica, visando auxiliar na investigação de um possível processo de desertificação em curso. A pesquisa foi realizada a partir de uma investigação espacial multiescalar, sendo utilizadas diferentes técnicas. Na macroescala foram sistematizadas informações sobre o contexto ambiental do médio curso da bacia do Rio Salitre, além da interpretação de imagens de satélite, fotografias aéreas, morfometria do relevo e simulação Monte Carlo para perda de solo na área. Na mesoescala, as análises se concentraram na vertente, com descrição morfológica de perfis de solo em toposequência, estudos quantitativos relacionados à erosão linear, e identificação de feições naturais e antrópicas. Na microescala foram utilizadas técnicas da micromorfologia dos solos. Foi delimitada uma área de 80 km<sup>2</sup> correspondente a um compartimento de relevo denominado depressão de fundo de vale (dfv) que, numa visão mais geral apresenta grandes manchas espaciais esbranquiçadas, as quais correspondem predominantemente a calcretes pulverulentos, saprolitos de calcretes e horizontes cálcicos subsuperficiais (materiais coluviais) expostos, que foram decapeados pela ação erosiva. Na toposequência analisada as poucas manchas com *solum* constituem principalmente CAMBISSOLOS HÁPLICOS Carbonáticos, embasados por materiais com altos teores de Carbonato de Cálcio Equivalente (500 g kg<sup>-1</sup> até 900 g kg<sup>-1</sup>), representando uma das áreas com maior conteúdo de carbonatos secundários em solos no Brasil. Foram encontradas feições típicas da precipitação de CaCO<sub>3</sub> no solo, como revestimentos e hipo-revestimentos calcíticos, preenchimentos calcíticos e nódulos carbonáticos individualizados e coalescidos, associados às primeiras fases da formação de um perfil de calcrete pedogênico, condizentes com as atuais condições do clima semiárido local. Nas encostas foram mapeadas 145.526 metros de feições erosivas lineares, em uma área de 20,8 km<sup>2</sup>, constituindo mecanismos acelerados de remoção dos solos e conseqüente entulhamento da drenagem do Rio Salitre. Na evolução do relevo local há estreita relação entre oscilações climáticas quaternárias e a morfodinâmica local, apontando para o entalhamento da drenagem em períodos mais úmidos que os atuais, o recuo de vertente com agradação do vale nos períodos semiáridos e transições climáticas. Atualmente a paisagem experimenta uma morfodinâmica de recuo de vertentes com intensa deterioração dos materiais carbonáticos e com limitações químicas frente à regeneração da vegetação, interagindo com altos índices de pobreza, e uma ocupação humana substancialmente baseada na supressão da cobertura vegetal, responsável pela ampliação da exposição dos solos nas últimas décadas (de 31% em 1950 para 69% em 2019). Este contexto ambiental instável coincide com o que se denominou de degradação extrema de terras áridas e semiáridas, condicionante básico para a instalação de um processo de desertificação.

**Palavras-chave:** Processo de desertificação. Calcificação em solos. Calcretes. Erosão dos solos. Micromorfologia de solos.

## ABSTRACT

In the Salitre River basin, in the state of Bahia, the interactions between semiarid climate and soils with calcic and calcretic horizons impose peculiar natural conditions in the composition of the landscape. This study proposes to relate materials and processes, mainly involving calcification in soils, dynamics, and evolution of slopes and desertification, analyzed from interrelated elements at different spatial scales. The objective is to understand the evolutionary dynamics and attributes of carbonate and their interaction with actual morphodynamics, aiming to investigate a possible process of desertification in progress. The research was carried out from a multiscale spatial investigation, using different techniques. At the macroscale, information was systematized on the environmental context of the middle course of the Salitre River basin and the interpretation of satellite images, aerial photographs, relief morphometry, and Monte Carlo simulation for soil loss in the area. At the mesoscale, the analyzes focused on the slope, with a morphological description of soil profiles in toposequence, quantitative studies related to linear erosion, and identification of natural and anthropogenic features. At the microscale, we used soil micromorphology techniques. An area of 80 km<sup>2</sup> was delimited corresponding to a relief compartment called valley bottom depression (dfv), which, in a more general view, presents large whitish spatial spots, which predominantly represent powdery calcretes, calcrete saprolites, and subsurface calcic horizons (colluvial materials) exposed, which were pickled by erosive action. In the toposequence, the few spots with solum mainly constitute carbonates HAPLIC CAMBISOLS, supported by materials with high contents of Equivalent Calcium Carbonate (500 g kg<sup>-1</sup>, up to 900 g kg<sup>-1</sup>), representing one of the areas with higher content of secondary carbonates in soils in Brazil. Typical features of CaCO<sub>3</sub> precipitation in the soil were found, such as calcitic coatings and hypocoatings, calcitic fillings and individualized and coalesced carbonate nodules, associated with the first phases of the formation of a pedogenic calcrete profile, consistent with the current conditions of the local semiarid climate. On the slopes, in interaction with the materials mentioned above, 145,526 m of linear erosive features were mapped in a 20.8 km<sup>2</sup> section, constituting aggressive mechanisms for soil removal and resulting debris from the Salitre River drainage. In the evolution of the local relief, there is a close relationship between quaternary climatic oscillations and local morphodynamics, pointing to the notching of the drainage in wetter periods than today, the slope retreat with the valley's pleasantness in the semiarid periods and climatic transitions. Currently, the landscape experiences a morphodynamics of retreat of slopes with intense deterioration of carbonate soils and with chemical limitations due to the regeneration of vegetation, interacting with high levels of poverty, and a human occupation substantially based on the suppression of vegetation cover, responsible for the expansion of soil exposure in recent decades (from 31% in 1950 to 69% in 2019). This unstable environmental context coincides with what has been called extreme degradation of arid and semiarid lands, an essential condition for installing a desertification process.

**Keywords:** Desertification process. Calcification in soils. Calcretes. Soil erosion. Soil micromorphology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia do Salitre no contexto hidrográfico da Bacia do São Francisco, e no contexto político dos territórios dos municípios do estado da Bahia – Brasil.....	24
Figura 2 - Recortes espaciais sobre imagens de satélite, em trechos representativos da paisagem no médio curso do rio Salitre, entre as comunidades rurais de Salgadinho e Abreus no município de Campo Formoso - BA. ....	26
Figura 3 - Mapa hipsométrico da bacia do Salitre, com perfil topográfico representado por um transecto (oeste-leste) situando o contexto da área de estudo. ....	28
Figura 4 - Mapa hipsométrico da depressão de fundo de vale e borda do platô carbonático, no médio curso da bacia do Salitre. ....	29
Figura 5 - Geologia da bacia do rio Salitre.....	31
Figura 6 - Localização da Formação Caatinga no Brasil e o contexto hipsométrico regional. ....	35
Figura 7 - Síntese dos procedimentos metodológicos e técnicas adotados. ....	42
Figura 8 - Imagens representando exemplo (em um pequeno recorte) do trabalho de delimitação da área com horizontes cálcicos expostos, localizado médio curso da bacia do Salitre no município de Campo Formoso-Bahia. ....	45
Figura 9 - Área delimitada para mapeamento das feições erosivas lineares e estimativa de perda de solo (trecho sul da dfv) no médio curso da bacia do Salitre, e localização e comprimentos (m) das feições medidas em campo.....	49
Figura 10 - Ilustrações e fotos das tipologias de formas das feições erosivas encontradas nas proximidades da comunidade rural de Taboa. ....	50
Figura 11 - Representação de trecho formado por dois pontos medidos de uma feição erosiva linear. ....	52
Figura 12 - Recorte de imagem do satélite WorldView-2 nos arredores da comunidade rural de Taboa, destacando o transecto da topossequência, perfil topográfico representativo e distribuição dos perfis de solo. ....	55
Figura 13 - Paredes de feição erosiva linear com 2,60m de profundidade. Atividade de observação das variações dos horizontes da cobertura pedológica na perspectiva vertical e ao longo da vertente. ....	56
Figura 14 - Contexto ambiental para formação de depósitos palustres: microambientes pedogênicos, palustres e lacustres. ....	73
Figura 15 - Perfil bidimensional da topossequência, apresentando arranjo vertical e lateral da cobertura pedológica ao longo da vertente. ....	83
Figura 16 - Litologias presentes na borda do platô carbonático.....	84
Figura 17 - Fotos dos perfis estudados (morfologia e paisagem associada) com divisão de horizontes e informações sobre cor e classe textural.....	87
Figura 18 - Gráfico apresentado relação entre Carbonato de Cálcio Equivalente ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e horizontes diagnósticos nos perfis de solos da topossequência (P3 a P9). ....	96
Figura 19 - Representação esquemática e foto do P1, evidenciando as pontuações esbranquiçadas na matriz de cor bruno-amarelada.....	101
Figura 20 - Fotomicrografias dos preenchimentos e revestimentos do horizonte Bik2 (P1). ....	101
Figura 21 - Fotomicrografias dos nódulos do horizonte Bik2 (P1).....	103
Figura 22 - Fotomicrografias do horizonte petrocálcico do perfil 1. ....	105
Figura 23 - Fotomicrografias da microestrutura granular e nódulos do horizonte Bik2 (P2).....	106

Figura 24 - Representação esquemática e fotos do perfil P3 .....	108
Figura 25 - Fotomicrografias dos revestimentos e preenchimentos de calcita fibrosa- aciculada, além de nódulos carbonáticos e de oxi-hidróxidos ferro nos horizontes Ck1 e Ck2 (P3).....	109
Figura 26 - Fotomicrografias das feições que sugerem a dissolução e precipitação de CaCO <sub>3</sub> e oscilação das condições redox no horizonte 2Ck1 (P3).....	112
Figura 27 - Fotomicrografias dos constituintes e feições que confirmam a natureza alóctone dos materiais no horizonte Ck1 (P4) .....	115
Figura 28 - Representação e fotos do perfil P8 .....	116
Figura 29 - Fotomicrografias das feições de revestimentos, hipo-revestimentos, preenchimentos e nódulos dos horizontes Ck1 e Ck2 (P8). .....	117
Figura 30 - Fotomicrografias do calcrete pulverulento dos horizontes 2Ck2 do P6 e 2Ck3 do P8. ...	120
Figura 31 - Representação esquemática e foto de perfil P9.....	121
Figura 32 - Fotomicrografias de tufo calcário no topo e calcrete pulverulento na base do perfil P9, destacando feições de dissolução e revestimentos de argila e óxidos de ferro sobre nódulo carbonático, coexistindo com preenchimentos carbonáticos. ....	123
Figura 33 - Fotomicrografias de lâminas extraídas do perfil 10 (P10) horizonte Bik1 correspondente a materiais de origem colúvio-aluviais. ....	125
Figura 34 - Mapa das feições erosivas lineares em trecho localizado no médio curso da bacia do rio Salitre no Município de Campo Formoso-Bahia. ....	134
Figura 35 - Gráficos com comparações de frequências relativas observadas e resultados das simulações das probabilidades de ocorrências pelo Monte Carlo.....	138
Figura 36 - Fotos apresentando diferentes morfometrias de feições erosivas lineares.....	140
Figura 37 - Acumulação de sedimentos ao longo da linha de drenagem do rio Salitre.....	141
Figura 38 - Fases de crescimento de espeleotemas em cavernas no atual semiárido do estado da Bahia, associados a períodos com padrões climáticos mais úmidos na região. ....	148
Figura 39 - Mapa das drenagens da bacia do Salitre, perfis topográficos em seções transversais ao rio principal e perfil longitudinal do rio Salitre em trecho sobre a Formação Caatinga, com destaque para o compartimento Depressão de Fundo de Vale.....	151
Figura 40 - Sedimentos fluviais soterrados por colúvios na baixa vertente, encontrados em um patamar superior à atual planície de inundação. ....	155
Figura 41 - Exemplo de avanço de duas cabeceiras de feições erosivas lineares sobre o platô carbonático, representando recuo da vertente e expansão da depressão de fundo de vale no médio curso do Salitre. ....	157
Figura 42 - Condição da drenagem do rio Salitre no fim do trimestre mais chuvoso do ano de 2015 em um trecho no médio curso: fluxo hídrico superficial interrompido, com destaque para alguns pontos de desembocadura de sistemas de feições erosivas lineares no leito fluvial. ....	160
Figura 43 - Conglomerado na borda do platô carbonático e cascalheira na base dos colúvios na média / baixa vertente no interior do compartimento dfv, na bacia do rio Salitre. ....	164
Figura 44 - Estações pluviométricas utilizadas para aquisição de dados pluviiais na área de estudo e entorno. Dados referentes aos índices pluviométricos (médias anuais de séries históricas). ....	175
Figura 45 - Variabilidade interanual das chuvas na bacia do Salitre entre os anos de 1963 e 2019 (Estações Junco-1 e Junco-2). ....	176

Figura 46 - Distribuição das chuvas ao longo do ano na estação pluviométrica Junco-2, na bacia do Salitre (período entre 2010 e 2019).....	177
Figura 47 - Gráfico com dias por ano com chuvas acima de 40mm, numa série histórica entre 1983 e 2019, na Estação Junco-2, na bacia do Salitre. ....	178
Figura 48 - Gráficos apresentando distribuição temporal (mm.30min-1) das chuvas em dois dias chuvosos dos anos de 2016 e 2017, registrados na Estação Salitre – Bahia. Os rótulos de dados no interior dos gráficos registram os índices (mm) dentro do intervalo de tempo (30min.) superiores a 1mm. ....	179
Figura 49 - Precipitação, evapotranspiração e índice de aridez na Estação Salitre - Bahia (2013 a 2019).....	181
Figura 50 - Faixas de rendimento mensal (salário-mínimo) na comparação entre o entrono do rio Salitre e o Município de Campo Formoso/BA. ....	184
Figura 51 - Fotos da localidade de Poço da Pedra no Município de Campo Formoso - BA.....	185
Figura 52 - Áreas utilizadas para o cultivo de sisal em fazendas localizadas nas proximidades da estrada entre as comunidades de Poço da Pedra e Lagoa do Porco, no município de Campo Formoso-BA.....	189
Figura 53 - Presença de ovinos nas proximidades do rio Salitre, em uma propriedade na comunidade de Taboa. ....	190
Figura 54 - Mapas e gráficos comparativos entre solo exposto e cobertura vegetal referente aos anos de 1950 e 2019, em um trecho que apresenta dois compartimentos de relevo, no médio curso da bacia do Salitre – Bahia. ....	195
Figura 55 - Comparação entre fotografia aérea de 1950 e imagem de Satélite de 2019 em um mesmo recorte espacial nos arredores da atual comunidade rural de Taboa, no médio curso da bacia do rio Salitre no município de Campo Formoso- Bahia.....	197
Figura 56 - Recorte espacial de parte de uma vertente na comunidade rural de Taboa. ....	198
Figura 57 - Mapa com gráfico da distribuição das áreas com cobertura vegetal e diferentes condições de exposição dos solos.....	199
Figura 58 - Exposição dos solos com feições de remoção em diversas localidades na depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre. ....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos em metros para LM, LN, PLM, PLN corresponde às 13 classes .....	51
Tabela 2 - Análises físicas dos perfis de solo de uma topossequência estudada na localidade de Taboa - Semiárido do estado da Bahia .....	86
Tabela 3 - Atributos químicos dos solos de uma topossequência estudada na localidade de Taboa - Semiárido do estado da Bahia.....	93
Tabela 4 - Número de feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas) visualizadas em imagens de satélite de alta resolução espacial em trecho no Médio Curso do Salitre / Campo Formoso-BA .....	135

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre o nível de organização dos materiais, a escala de observação e os processos na área de estudo. ....	41
Quadro 2 - Síntese da sequência de procedimentos utilizados para o mapeamento das Feições Erosivas Lineares – FELs e estimativa de perda de solo nas vertentes. ....	48
Quadro 3 - Características morfológicas associadas as etapas evolutivas (modelos físico-químicos de acumulação de carbonatos), observadas em solos cálcicos e calcretes pedogênicos desenvolvidos sobre materiais com menos de 20% de cascalhos em quaclimas áridos e semiáridos. ....	75
Quadro 4 - Quadro síntese da classificação dos perfis de solo da topossequência e condições no ambiente. ....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACGS - Aerospace Cartographic and Geodetic Service.

ACIACF - Associação Comercial Industrial e Agropecuária de Campo Formoso.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba

DFV – Depressão de fundo de vale.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

FELs – Feições Erosivas Lineares

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSA - Instituto Nacional do Semiárido.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

PC – Platô carbonático.

QGIS – Quantum Gis.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.

PPL - Luz Polarizada Plana

SIG - Sistemas de Informações Geográficas.

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.

SUVALE - Superintendência do Vale do São Francisco.

USGS - United States Geological Survey.

XPL - Luz Polarizada Cruzada

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	17
S E Ç Ã O I - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	23
1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL. ....	24
1.1. Localização e apresentação da área. ....	24
1.2. Relevo da bacia do rio Salitre: bases para definição da área de estudo. ....	27
1.3. Geologia.....	30
1.3.1. Geologia da bacia hidrográfica do rio Salitre. ....	30
1.3.2. A Formação Caatinga .....	34
1.4. Solos .....	37
1.5. Clima, Vegetação e Hidrografia .....	38
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	40
2.1. A perspectiva multiescalar.....	40
2.2. Detalhando as técnicas e os procedimentos: práticas de campo, gabinete e laboratório. ....	42
2.2.1. Levantamento de dados socioambientais da bacia do Salitre: informações gerais em fontes secundárias. ....	42
2.2.2. Delimitação da área com horizontes cálcicos expostos (solos), correspondente ao compartimento dfv, no médio curso da bacia do Salitre. ....	44
2.2.3. Classificação/interpretação de imagem de satélite atual e fotografias aéreas da década de 1950: expansão das áreas com solos expostos .....	46
2.2.4. Mapeamento das feições erosivas lineares e estimativa de perda de solo .....	47
2.2.5. Confecção de MDE, perfil topográfico e mapa de superfícies expostas na vertente selecionada. ....	53
2.2.6. A topossequência, descrição morfológica e coleta de amostra em campo .....	53
2.2.7. Análises físicas e químicas. ....	57
2.2.8. Análises micromorfológica.....	58
2.3. Integração e análise dos dados.....	58
S E Ç Ã O II - MATERIAIS CARBONÁTICOS E OS SOLOS NO MEDIO CURSO DA BACIA DO RIO SALITRE, BAHIA. ....	60
3. SOLOS CARBONÁTICOS E A FORMAÇÃO DE HORIZONTES CÁLCICOS E CALCRETES EM CLIMA SEMIÁRIDO .....	61
3.1. Rochas carbonáticas.....	61
3.2. Solos associados a materiais carbonáticos .....	61

3.3.	Condições semiáridas e a acumulação de carbonato de cálcio secundário: formação de horizontes cálcico e petrocálcico .....	63
3.4.	Caracterização e importância dos solos carbonáticos em regiões com déficit hídrico .....	67
3.5.	Calcretes e os carbonatos continentais .....	70
3.6.	Etapas evolutivas de perfis de solos cálcicos e calcretes .....	74
3.7.	Micromorfologia de solos com acumulação de carbonato de cálcio .....	77
4.	<b>A COBERTURA PEDOLÓGICA EM UMA TOPOSEQUÊNCIA NO MÉDIO CURSO DO RIO SALITRE</b> .....	82
4.1.	A cobertura pedológica: atributos físicos e morfológicos dos materiais na vertente. ....	82
4.1.1.	Materiais no platô: solos como elúvios .....	84
4.1.2.	Materiais no interior da depressão: solos desenvolvidos de colúvios e alúvios .....	89
4.1.3.	Materiais no interior da depressão: a descontinuidade de material de origem na base dos perfis .....	91
4.2.	Caracterização química e o CaCO <sub>3</sub> equivalente da cobertura pedológica na toposequência.....	92
4.2.1.	Atributos químicos.....	92
4.2.2.	CaCO <sub>3</sub> Equivalente (CCE).....	95
4.3.	Classificação dos solos da vertente .....	98
4.4.	Caracterização micromorfológica.....	100
4.4.1.	Solos no platô carbonático.....	100
4.4.2.	Solos na dfv (da alta à baixa vertente) .....	108
4.5.	Considerações parciais: o que os solos dizem?.....	126
	<b>S E Ç Ã O III - PROCESSOS PEDOGEOLOGIAIS SOBRE OS SOLOS CARBONÁTICOS NO MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO SALITRE</b> .....	128
5.	<b>DINÂMICA DAS VERTENTES A PARTIR DO DIMENSIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA EROÇÃO LINEAR</b> .....	129
5.1.	Erosão hídrica dos solos: ênfase nos processos erosivos lineares .....	129
5.2.	Erosão linear e perda de solo nas vertentes no médio curso da bacia do rio Salitre .....	133
5.2.1.	Quantificação e distribuição espacial das feições erosivas lineares .....	133
5.2.2.	Estimativa de perda de solo por erosão linear nas vertentes .....	137
6.	<b>DINÂMICA DE VERTENTES E A EVOLUÇÃO DA PAISAGEM NO MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO SALITRE</b> .....	143
6.1.	Dinâmica e evolução de vertentes em áreas semiáridas .....	143
6.2.	Paleoclimas Quaternários do semiárido brasileiro: foco na bacia do rio Salitre. ....	147
6.3.	Evolução da paisagem no médio curso do Salitre: evidências nas formas e nos solos .....	150
6.3.1.	A incisão da drenagem na formação da dfv.....	150
6.3.2.	A abertura da dfv sobre condições semiáridas.....	155

6.3.3. Os colúvios e os solos associados no interior da dfv .....	162
6.3.4. Considerações parciais: o que a paisagem diz? .....	166
<b>7. O DESENCADEAMENTO DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM ÁREAS CARBONÁTICAS NO MÉDIO CURSO DO RIO SALITRE.....</b>	<b>167</b>
7.1. Entendendo o contexto teórico sobre o processo de desertificação .....	167
7.1.1. O conceito de desertificação.....	167
7.1.2. Os indicadores de desertificação .....	171
7.1.3. A erosão dos solos como um importante indicador.....	173
7.2. Desertificação no médio curso do Salitre.....	174
7.2.1. O clima local como indicador de situação: característica da pluviosidade e índice de aridez .....	174
7.2.2. Condição socioeconômica (renda e analfabetismo) no médio curso da bacia do rio Salitre no Município de Campo Formoso: pobreza e degradação das terras.....	182
7.2.3. Ocupação das vertentes no médio curso da bacia do rio Salitre: atividades econômicas implantadas .....	187
7.2.4. Solos carbonáticos, seus atributos e o processo de desertificação no médio curso do rio Salitre.....	191
7.2.5. Alteração na cobertura vegetal e ampliação da exposição dos solos: uma visão em distintas imagens .....	194
7.2.6. Desertificação cárstica ou desertificação em área carbonática?.....	202
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>204</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>207</b>
<b>APÊNDICE A - Recorte espacial de imagem de satélite e perfil topográfico .....</b>	<b>237</b>
<b>APÊNDICE B - Descrição morfológica dos perfis de solo .....</b>	<b>238</b>
<b>APÊNDICE C - Descrição micromorfológica .....</b>	<b>250</b>
<b>APÊNDICE D - Imagens demonstrativas da relação entre o processo de precipitação/acumulação de CaCO<sub>3</sub> nos solos carbonáticos e a paisagem em desertificação.....</b>	<b>252</b>

## INTRODUÇÃO

Na atualidade o termo semiárido brasileiro ultrapassa critérios climáticos rígidos, estabelecendo uma região geográfica de caráter político e administrativo com caracterização social, cultural e econômica específica no contexto do território brasileiro. Atualmente os critérios para a definição de quais municípios estão na região semiárida são: i) pluviosidade anual inferior a 800mm, ii) índice de aridez menor que 0,5 e/ou iii) percentual diário de déficit hídrico acima de 60%, estabelecendo para o semiárido uma área de quase 1 milhão de km<sup>2</sup> (BRASIL, 2017). Nesse sentido, há de se reconhecer a existência de grande diversidade de paisagens naturais dentro dessa região, exercendo distintas influências nas atividades socioeconômicas e nos processos ambientais.

A área delimitada para estudo nesta tese possui especificidades naturais dentro do semiárido brasileiro, promovida em parte pelas condições mais secas e extremas do Brasil, em termos de pluviosidade, índice de aridez e déficit hídrico. Os índices anuais médios de chuva estão próximos dos 400 mm, bastante concentrada em um curto período, no qual o potencial de evapotranspiração é superior à precipitação em mais de 90% dos dias do ano. Para além do clima, outra especificidade marcante é que a área está sobre materiais altamente carbonáticos e geologicamente recentes, dominados por calcretes, que impõem peculiaridades na composição da paisagem.

As altas temperaturas e o baixo volume de chuva sobre materiais com alto teor de carbonato de cálcio (rochas, sedimentos e solos) configuram condições intempéricas e pedogenéticas atreladas à calcificação e acumulação de carbonatos secundários. Esse contexto, por sua vez, pode conduzir à gênese de solos específicos, com processos de vertente influenciados por uma dinâmica morfológica típica de ambientes áridos e semiáridos secos em interação com materiais carbonáticos.

A área está localizada no médio curso do rio Salitre, no município de Campo Formoso no norte do estado da Bahia, possuindo extensão de aproximadamente 80 km<sup>2</sup>, com baixa densidade de cobertura vegetal e extensas manchas de solos expostos, além de visíveis feições erosivas. A área apresenta sinais de intensa degradação dos solos, em níveis superiores aos encontrados em seu entorno, possuindo alta densidade de feições erosivas lineares com centenas de metros de comprimento e profundidade que ultrapassa 4 metros, além de marcas de erosão laminar e movimentos de massa. O forte decapeamento da cobertura pedológica exuma horizontes cálcicos e calcretes, apontando para uma grande movimentação de materiais para o leito do rio Salitre, que visivelmente está sendo entulhado. Esta intensa morfodinâmica das

vertentes, em pleno semiárido seco, coincide com o que se denominou de degradação extrema de terras áridas e semiáridas, condicionante básico para uma área em desertificação.

A partir deste contexto, três questionamentos principais foram feitos: quais as características (morfológicas, físicas e químicas) dos solos dessa área? Como a dinâmica de vertente e a evolução do relevo podem explicar o atual estado em que se encontra a paisagem? Quais condições pedogeomorfológicas podem ser apontadas como gatilhos para o entendimento sobre um possível processo de desertificação na área?

Essas questões conduzem a execução deste estudo, que tem como objetivo geral compreender a dinâmica evolutiva dos solos associados aos materiais carbonáticos na bacia do rio Salitre no semiárido baiano, e sua interação com as condições morfodinâmicas, visando auxiliar na investigação sobre um possível processo de desertificação em curso.

Os objetivos específicos são:

- Dimensionar a área de solos com elevada acumulação de carbonato de cálcio secundário, correspondente ao recorte espacial em estágio de degradação intensa das terras (desertificação) no médio curso do rio Salitre.
- Caracterizar as propriedades físicas e químicas dos solos carbonáticos (principalmente associados à calcretes) a partir de uma topossequência representativa das condições pedogeomorfológicas locais.
- Analisar aspectos micromorfológicos dos solos com acumulação de carbonato de cálcio secundário, e relacioná-los à evolução da paisagem na área de estudo.
- Estimar o volume de materiais deslocados das vertentes para o leito do rio Salitre por ação da erosão linear, e relacioná-la com a morfodinâmica da paisagem.
- Investigar os processos de vertente à luz dos estudos paleoclimáticos locais, visando inferir sobre a evolução da paisagem.
- Caracterizar importantes condicionantes ambientais atuais (clima, perfil socioeconômico da população, ocupação da área, solos e exposição dos solos), que possam contribuir para o possível desenvolvimento de um processo de desertificação.

Diversos aspectos justificaram a realização deste estudo. Em primeiro lugar, foram levantadas informações sobre a gênese e evolução da cobertura pedológica com horizontes cálcicos em interação com calcretes, que mesmo analisados em um pequeno recorte espacial, apresentam resultados que poderão contribuir significativamente na ampliação dos estudos pedológicos sobre a gênese de solos sobre materiais carbonáticos em ambientes com déficit hídrico.

Este trabalho também apresenta o teste de novos procedimentos metodológicos para estimar a perda de solo em vertentes por ação da erosão linear. Em adição à técnica utilizada, foi valorizada uma abordagem integrativa e dinâmica, que associa a quantificação do deslocamento do material das encostas ao processo morfodinâmico em curso.

O estudo apresenta para a comunidade científica um recorte espacial (área no contexto do semiárido brasileiro) para o aprofundamento nos estudos sobre erosão e desertificação em ambientes carbonáticos, propondo um aprofundamento nas investigações sobre as condições dos solos e sua relação com o relevo local (perspectiva pedogeomorfológica).

Diante da complexidade e importância do tema desertificação para o semiárido brasileiro e do necessário aprofundamento acerca de elementos que induzem ou aceleram a degradação das terras, é válido investigar as condições pedogeomorfológicas e biofísicas das áreas carbonáticas com predomínio de precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , contribuindo no entendimento de processos que estão colaborando decisivamente para o desencadeamento da desertificação.

Este trabalho buscou, ainda, apontar a necessária justaposição entre processos dinâmicos atuais, como a desertificação, e o quadro evolutivo da paisagem, demonstrando que o sistema ambiental no médio curso da bacia do rio Salitre estabelece, enquanto etapa evolutiva, uma tendência à degradação acelerada das vertentes e intensa agração dos vales, que alimentados pela ocupação desordenada, tangencia para a chamada desertificação.

Poucos estudos existem sobre a área em questão. Por esse motivo, essa pesquisa contribui para a disponibilização de dados acerca das características dos solos do médio curso da bacia do rio Salitre no semiárido baiano. A disponibilização desses dados contribui para a confecção de planos de recuperação de área degradada e no planejamento para o desenvolvimento local. A expansão das manchas da degradação na caatinga chama atenção para o necessário cuidado na ocupação e uso deste geo-ecossistema. A expansão da degradação não compromete apenas a biodiversidade da caatinga, mas afeta também a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos, já escassos nessa região semiárida.

Para que os objetivos fossem alcançados, foi realizada uma investigação espacial multiescalar, que integrou informações de um contexto mais geral, associada à presença da Formação Caatinga (carbonática) no semiárido norte do estado da Bahia, com dados referentes à forma e processos superficiais em uma vertente, passando pela abordagem associada aos perfis de solos em topossequência, até informações analíticas dos materiais, interpretados sob lentes microscópicas. Isso quer dizer que foram utilizadas diferentes técnicas de investigação para atender as diferentes escalas, partido do sensoriamento remoto via interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas, na macroescala, para estudos morfológicos e

morfométricos da vertente e de perfis de solo, na mesoescala, até a micromorfologia para estudo das organizações elementares dos solos, na microescala.

A tese foi estruturada em sete capítulos, os quais foram organizados em seções com a seguinte distribuição:

- **Seção I (Capítulos 1 e 2)** - Seção que reúne a caracterização geral da área de estudo, a apresentação do problema que motivou essa pesquisa e o detalhamento dos procedimentos metodológicos utilizados.

O primeiro capítulo situa a área e apresenta as condições morfológicas da paisagem como base para delimitação do espaço estudado, apresentado também uma caracterização ambiental do contexto geral, utilizando dados secundários, com ênfase no relevo, nas unidades litoestratigráficas (foco na unidade carbonática Formação Caatinga), nos solos, clima, vegetação e hidrografia, que juntos apontam para aspectos biofísicos peculiares no território brasileiro.

No segundo capítulo foi discutido detalhadamente as etapas dos procedimentos metodológicos desenvolvidos, desde as técnicas de Sensoriamento Remoto/SIG para abordagens da paisagem em um contexto espacial geral, até as práticas de campo ao longo de uma topossequência, as técnicas na microescala, fundamentadas na análise de amostras de materiais em laboratórios.

- **Seção II (Capítulos 3 e 4)** – Seção dedicada à caracterização dos solos carbonáticos, com um capítulo abrangendo discussões teóricas sobre os materiais carbonáticos e outro capítulo apresentando resultados que caracterizam as formações presentes na área de estudo.

O capítulo 3 aborda aspectos teóricos que contextualizam desde as principais rochas carbonáticas, à gênese dos solos com horizontes cálcicos em um quadro ambiental semiárido, até a formação de calcretes e outros carbonatos continentais, além de uma breve discussão sobre as organizações em microescala de solos com acumulação de carbonato de cálcio.

O capítulo 4, intitulado “Solos carbonáticos em uma topossequência no médio curso do Salitre”, apresenta e discute os resultados, apontando as características atuais dos materiais carbonáticos encontrados na topossequência (proveniência dos materiais; aspectos físicos e químicos; classificação dos solos), além de sua distribuição e aspectos genéticos. Contempla também os resultados das análises micromorfológicas de amostras dos solos, examinadas em associação com os dados macromorfológicos de campo, visando auxiliar na compreensão

sobre oscilações na paleoprecipitação e evolução da paisagem no Quaternário (relação materiais e processos) no médio curso do Salitre.

- **Seção III (Capítulos 5, 6 e 7)** - Seção dedicada às discussões sobre a evolução da paisagem no médio curso do Salitre, enfatizando os processos morfodinâmicos e pedogeomorfológicos na área. A seção é intitulada “Processos pedogeomorfológicos sobre solos no semiárido baiano”, na qual cada capítulo possui tópicos com referencial teórico e resultados, de acordo com a subdivisão proposta.

O capítulo 5 é intitulado “Dinâmica nas vertentes a partir do dimensionamento e caracterização da erosão linear”. Este abordou a morfodinâmica atual desenvolvida em um recorte no médio curso da bacia do Salitre, com ênfase nos processos de vertente mais visíveis e importantes na área: as Feições Erosivas Lineares - FEL. São dois tópicos dentro deste capítulo, sendo o primeiro destinado às discussões teóricas sobre os processos erosivos lineares, e o segundo à apresentação dos resultados encontrados a partir do dimensionamento das feições erosivas, da perda de solo (volume) e do conseqüente entulhamento do rio Salitre. O capítulo 6 tem como título “Dinâmica de vertentes e a evolução da paisagem no médio curso da bacia do rio Salitre”, capaz de situar os atuais processos de vertente dentro de um encadeamento evolutivo, atribuído por modelos geomorfológicos de evolução do relevo para regiões semiáridas, atrelados às oscilações climáticas durante o Quaternário. Este capítulo foi organizado em três tópicos, sendo dois empenhados nos aspectos teóricos mais pertinentes diante da discussão proposta, e um apresentando discussões sobre os resultados acerca da evolução da paisagem na área.

O primeiro tópico do capítulo 6 diz respeito a dinâmica e evolução de vertentes em áreas semiáridas, com destaque para processos que atuaram no Quaternário e que deixaram heranças nas formas e nos materiais. O segundo tópico focou na discussão sobre paleoambientes do semiárido brasileiro, apontando alguns estudos realizados no norte do estado da Bahia (localização da bacia do Salitre) que confirmou oscilações nas condições de umidade durante o Quaternário. O terceiro tópico discorreu sobre a evolução da paisagem, interpretada a partir das oscilações paleoclimáticas quaternárias, com evidências apontadas em feições e morfologias do relevo local e materiais associados.

No 7º e último capítulo foi apresentada discussões sobre as relações entre o contexto natural local (materiais carbonáticos, clima semiárido bastante seco e a instabilidade morfodinâmica das vertentes), o quadro socioeconômico presente e a ocupação do espaço pelas atividades econômicas, capazes de desenhar um cenário de degradação das terras condizente com o

conceito de desertificação. O primeiro tópico foi destinado para discussão teórica-conceitual sobre a desertificação e seus indicadores, com destaque para a exposição e degradação dos solos como principais indicadores desse fenômeno em terras semiáridas. No segundo tópico foram contemplados dois conjuntos de indicadores de situação, que estabelecem alta susceptibilidade da área à desertificação: as especificidades climáticas (principalmente o comportamento da pluviosidade e o índice de aridez); e uma síntese das condições socioeconômicas da população. Foi realizado um breve histórico da ocupação das vertentes e as principais atividades econômicas implantadas no médio Salitre (contexto histórico). Ademais, foram apresentados elementos que apontam para o efetivo processo de desertificação a partir da análise da exposição dos frágeis solos carbonáticos.

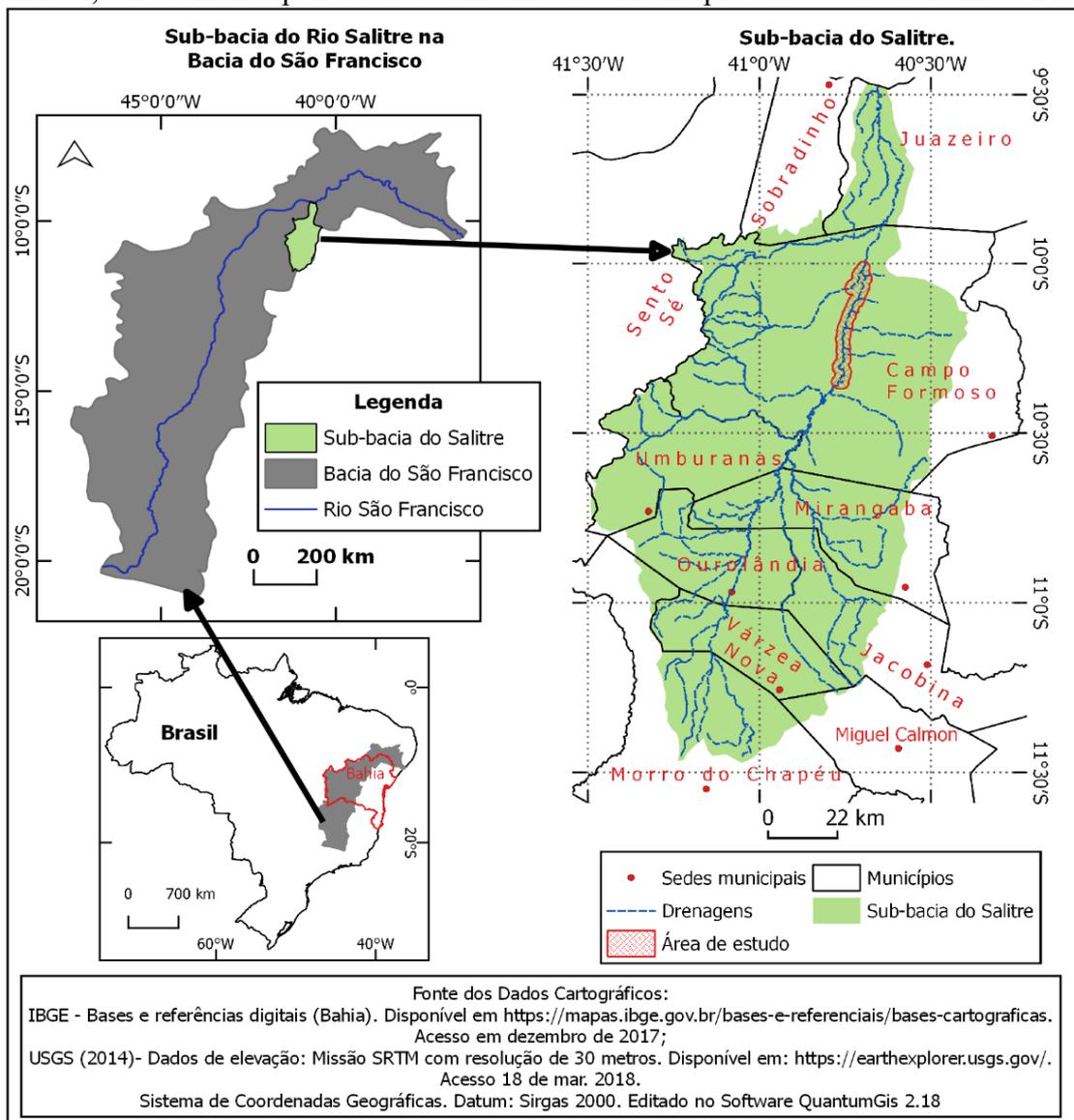
**SEÇÃO I - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA E  
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

# 1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL.

## 1.1. Localização e apresentação da área.

A área está localizada em um pequeno trecho no contexto hidrográfico da bacia do rio São Francisco, mais especificamente no médio curso da bacia hidrográfica do Salitre no município de Campo Formoso – Bahia, com sede situada a aproximadamente 400 km de Salvador-BA. Esta bacia possui uma área, segundo Bahia (2017), de 14.452 km<sup>2</sup>, totalmente inserida no semiárido do estado da Bahia, tendo suas cabeceiras na parte norte da Chapada Diamantina, no município de Morro do Chapéu e confluência com o rio São Francisco, no município de Juazeiro (FIGURA 1).

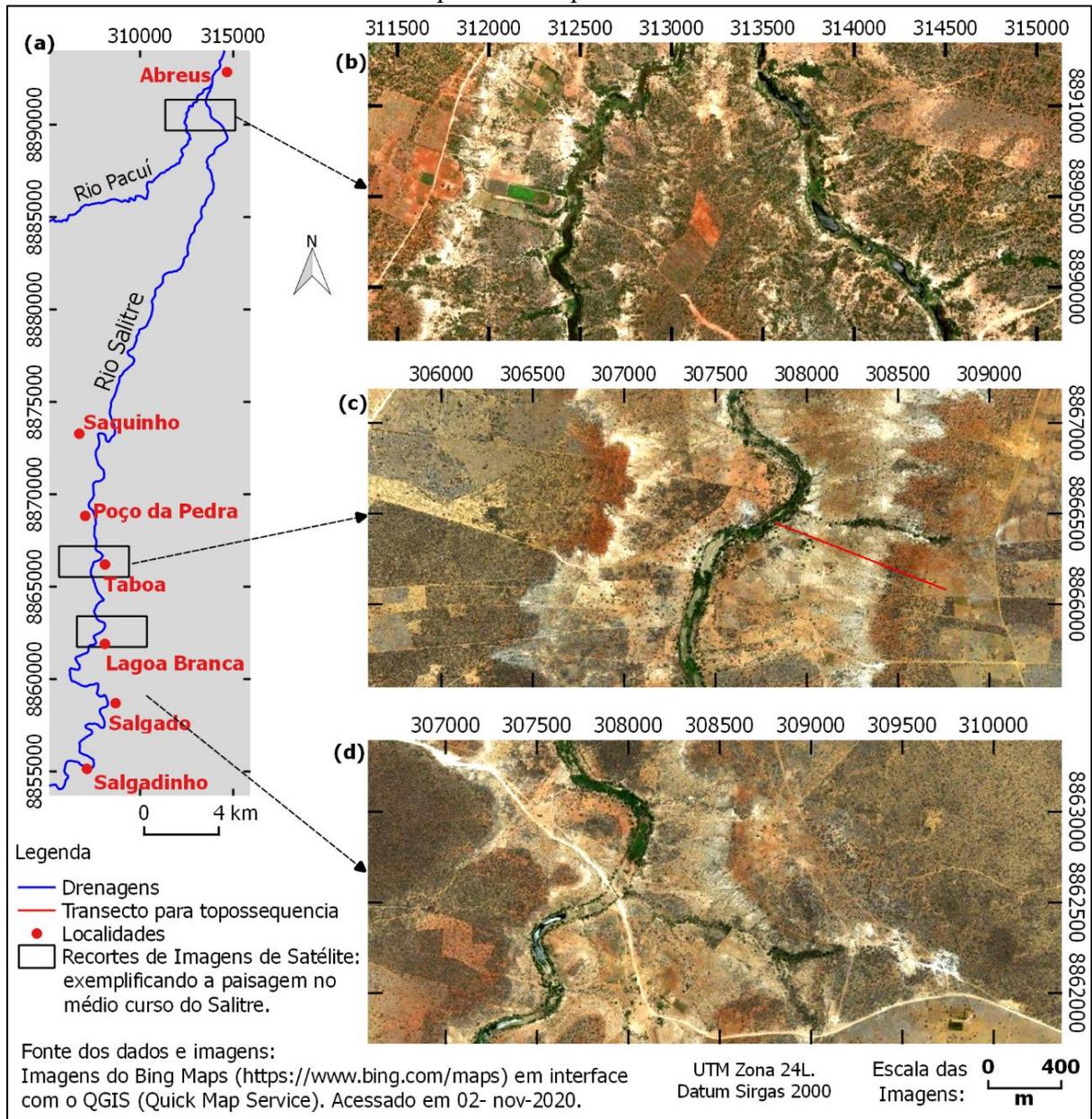
Figura 1 - Localização da bacia do Salitre no contexto hidrográfico da Bacia do São Francisco, e no contexto político dos territórios dos municípios do estado da Bahia – Brasil.



A bacia é tipicamente rural e sua principal atividade econômica é a agricultura, tanto em sequeiro com cultivos adaptados à semiaridez, como a agricultura irrigada, no baixo curso pelas águas da barragem de Sobradinho, e nos médio e alto cursos, por água subterrânea, além de uma pecuária extensiva, predominantemente caprinos e ovinos em propriedades familiares (MEDEIROS e GONÇALVES, 2003; BAHIA, 2017). A Figura 1 mostra que apesar da bacia banhar diversos municípios, apenas Umburanas, Ourolândia e Várzea Nova, estão com suas sedes (área urbana) dentro da área hidrográfica, com populações urbanas que não ultrapassam os 10.000 habitantes em cada um dos três municípios (IBGE, 2020), afirmando o caráter fortemente rural dessa bacia.

A área de estudo neste trabalho corresponde a um recorte espacial no médio curso da bacia, numa estreita depressão no fundo do vale do rio Salitre, onde a paisagem possui visíveis manifestações e marcas da intensa degradação das terras, com baixa densidade de cobertura vegetal e extensas manchas com solos expostos (FIGURA 2), além de inúmeras feições erosivas. Está localizada entre as comunidades de Salgadinho (sul) e Abreus (norte), a 65 e 80 km, respectivamente, à noroeste da sede do município de Campo Formoso – BA, com densidade demográfica muito baixa, inferior a 3 hab./km<sup>2</sup> de acordo com IBGE (2010).

Figura 2 - Recortes espaciais sobre imagens de satélite, em trechos representativos da paisagem no médio curso do rio Salitre, entre as comunidades rurais de Salgadinho e Abreus no município de Campo Formoso - BA.



Obs.: A forte exposição de solos é marcante nas proximidades do rio Salitre em todo segmento apresentado em (a). As imagens (b), (c) e (d) exemplificam a condição da paisagem em alguns trechos. A localização do transecto para a topossequência é apresentado em (c).

Para estudo mais detalhado foi selecionada uma vertente representativa, capaz de abarcar diferentes fácies dos carbonatos da Formação Caatinga nos dois compartimentos de relevo estudados nesta tese, visando análise dos solos a partir da abertura de perfis em topossequência. A vertente está localizada nos arredores da comunidade rural de Taboa (FIGURA 2), a 70 km da sede do município de Campo Formoso - BA (FIGURA 1).

## **1.2. Relevo da bacia do rio Salitre: bases para definição da área de estudo.**

A bacia do Salitre possui duas macrounidades geomorfológicas (SILVA, 2006). A primeira constitui uma zona marginal com relevo montanhoso e altitudes acima de 750 metros, modelada sobre a sequência metassedimentar do Grupo Chapada Diamantina, onde a rede de drenagem está entalhada nas estruturas planares das rochas, com padrão subretangular. A segunda unidade corresponde à porção central da bacia, com relevo aplainado, onde os cursos d'água são bem entalhados e com estreitas planícies de inundação banhando litologias do Grupo Una e da Formação Caatinga (SILVA, 2006). Esta última unidade de relevo foi chamada de platô carbonático (BRITO NEVES et al., 2012).

O mapa hipsométrico apresentado na Figura 3, confeccionado a partir de dados de elevação topográfica SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30 metros (USGS, 2014), situa topograficamente as informações relatadas no parágrafo anterior. A partir do referido mapa é possível verificar a presença do relevo mais movimentado e com maiores altitudes nas extremidades oeste, leste e sul, próximos aos divisores de água. Já a porção central da bacia possui áreas significativamente planas, conforme perfil topográfico presente na Figura 3, com declividades inferiores a 3%, que se estendem, no contexto da bacia, por aproximadamente 30 km no sentido oeste-leste. Também no mesmo perfil verifica-se, nas proximidades da drenagem do rio principal no médio curso, a presença de estreito trecho rebaixado em relação ao platô carbonático, identificado como a área de estudo, que constitui um compartimento de relevo bastante peculiar, nomeado nesta tese como depressão de fundo de vale - dfv.

O recorte espacial de investigação nessa pesquisa foi, portanto, a dfv, que corta o platô carbonático no médio curso da bacia (FIGURA 4). A dfv constitui uma incisão fluvial sobre a Formação Caatinga, instalando um vale escavado que pode alcançar aproximadamente 50 metros de profundidade (AULER, 1999). A Figura 4 também apresenta esta incisão a partir de um perfil topográfico transversal ao rio Salitre (Transecto A), capaz de apontar a presença de distintos segmentos de vertentes cujos materiais e processos foram investigados nesta tese.

Figura 3 - Mapa hipsométrico da bacia do Salitre, com perfil topográfico representado por um transecto (oeste-leste) situando o contexto da área de estudo.

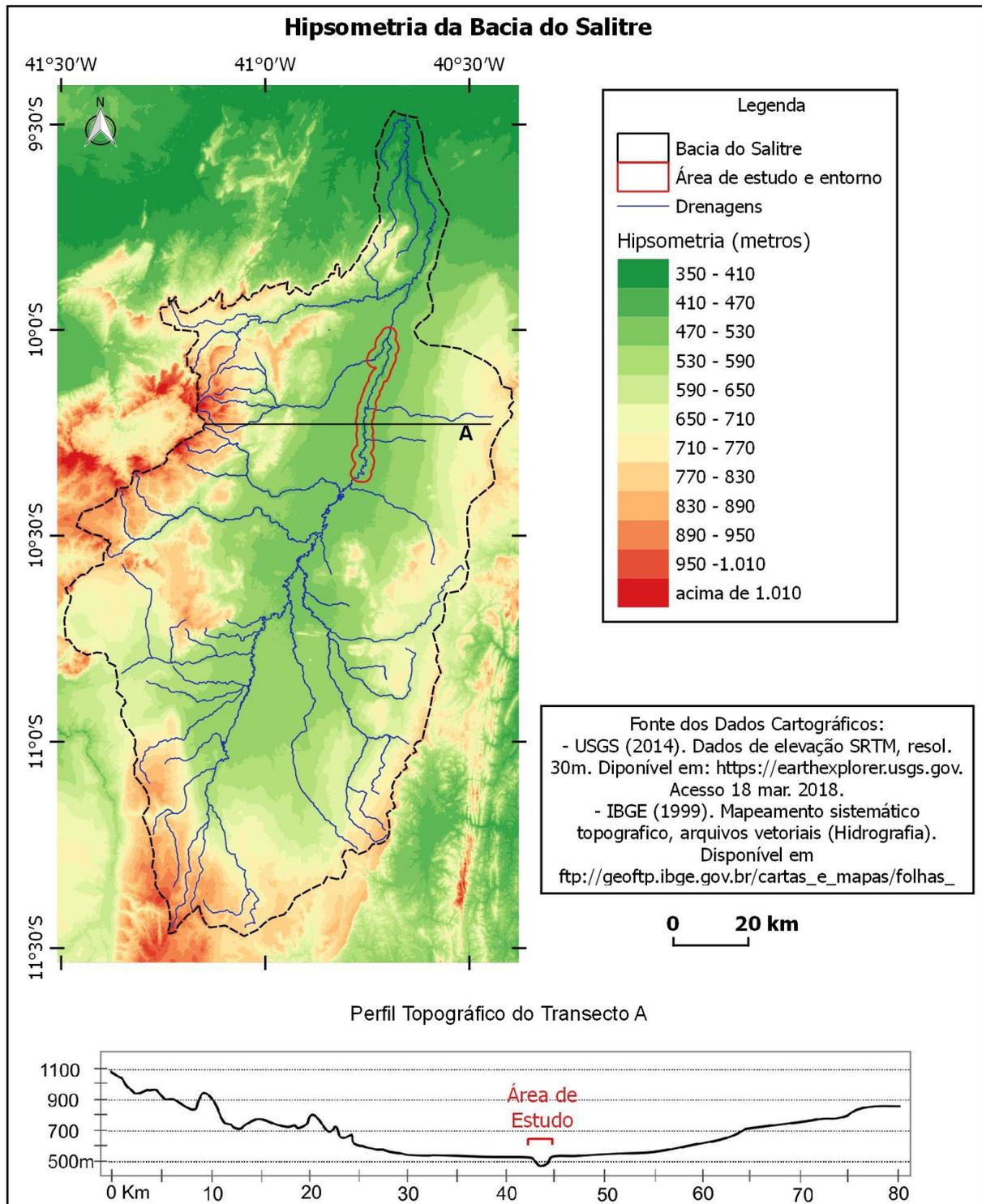
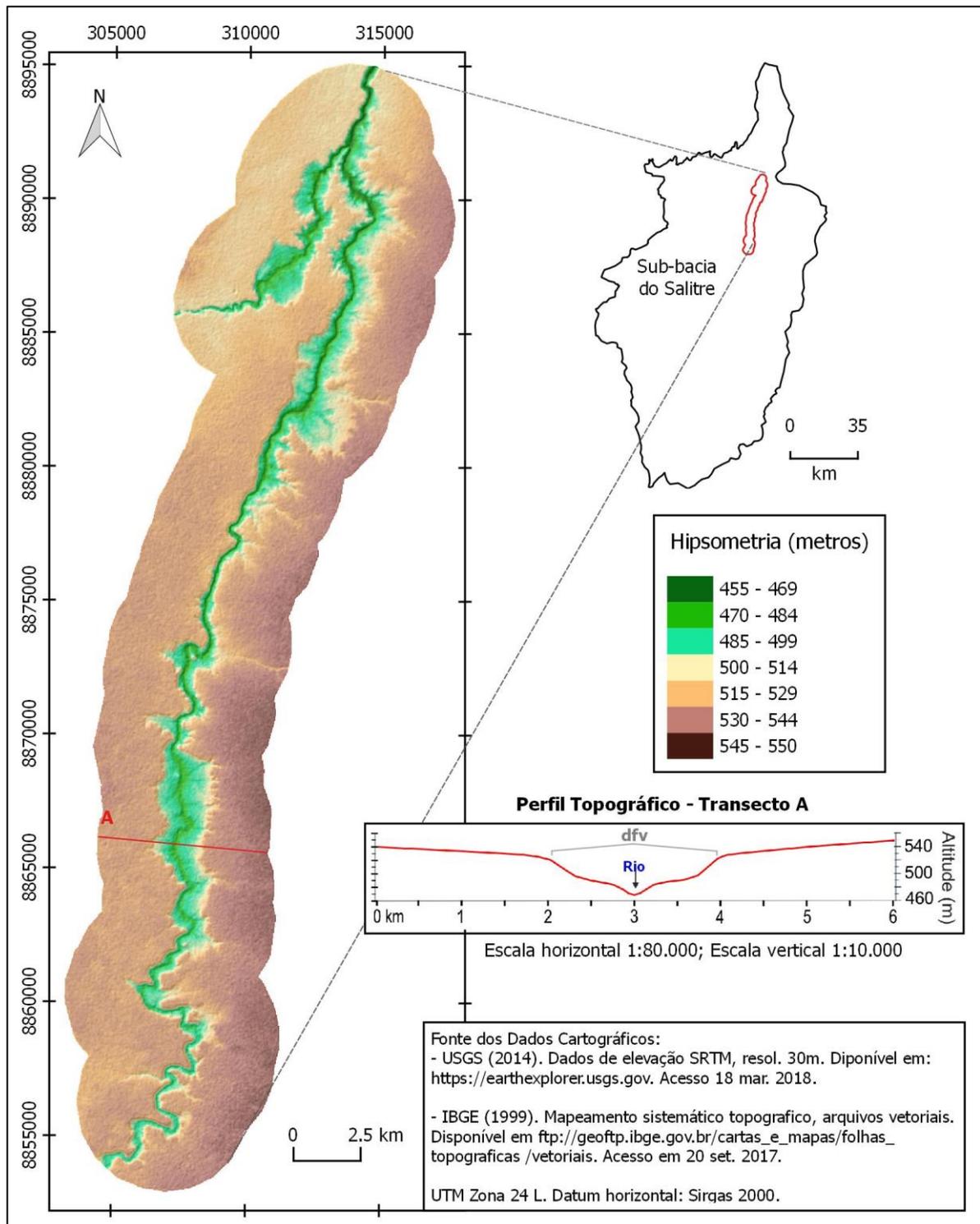


Figura 4 - Mapa hipsométrico da depressão de fundo de vale e borda do platô carbonático, no médio curso da bacia do Salitre.



À direita está sendo apresentado perfil topográfico do transecto A (oeste-leste) nas proximidades da comunidade de Taboa, no município de Campo Formoso-BA.

O relevo é um fator decisivo na dinâmica ambiental da área de estudo. Nos longos trechos planos se verifica menos áreas com solos degradados, mas, nos trechos nas proximidades do

leito do rio principal (dfv), com maiores declividades topográficas, se verifica intensa morfodinâmica a partir da alta densidade de ravinas, voçorocas e fortes indícios de erosão laminar e, até mesmo, cicatrizes de movimentos de massa.

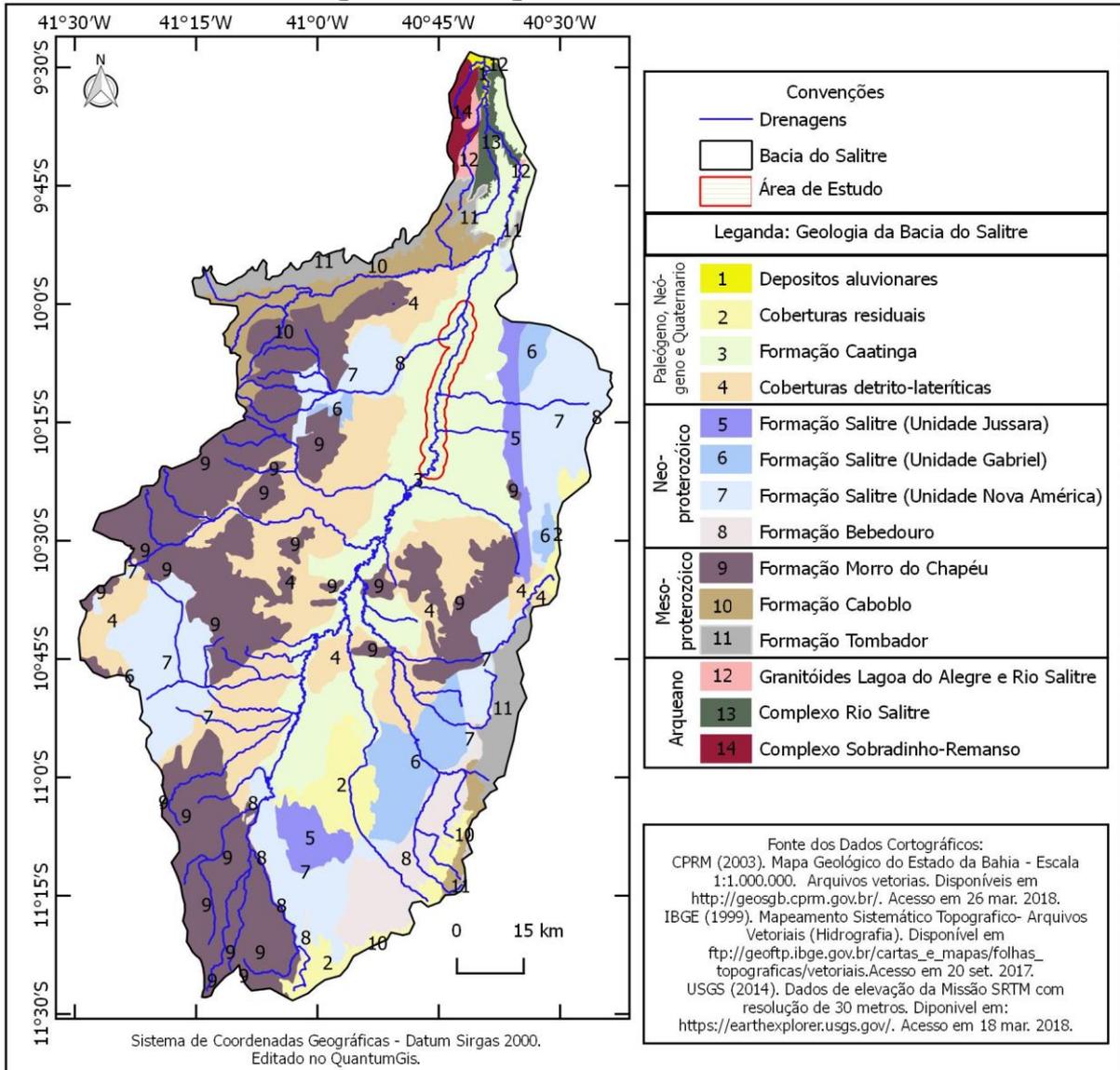
### **1.3. Geologia**

Para melhor contextualização das condições geológicas da área de estudo, optou-se por apresentar informações litoestratigráficas gerais da bacia hidrográfica do rio Salitre com um foco particular na Formação Caatinga, dominante na área de estudo.

#### **1.3.1. Geologia da bacia hidrográfica do rio Salitre.**

A bacia está inserida em terrenos da porção norte do Cráton São Francisco (ALMEIDA, 1977; BARBOSA et al., 2003) e apresenta significativa variedade de rochas com características e idades distintas. Uma síntese das litoestratigrafias da bacia do Salitre é apresentada na Figura 5, organizadas a partir de sua ordem cronológica (partindo das unidades mais antigas), em: I – Arqueanas; II - Mesoproterozóicas; III - Neoproterozóicas; IV - Paleógenas, Neógenas e Quaternárias. A abordagem do contexto geológico auxilia na compreensão da dinâmica espaço-temporal da paisagem e na identificação dos solos locais.

Figura 5 - Geologia da bacia do rio Salitre.



**I – Arqueanas** – são as rochas do embasamento, possuindo exposições restritas, presentes principalmente no baixo curso da bacia, ao norte, nas proximidades da confluência com o rio São Francisco. Estão representadas pelas unidades:

- Complexo Sobradinho-Remanso - com idades entre 3000 e 3500 Ma, com ortognaissicos migmatíticos, de composição tonalítica a granodiorítica com enclaves de rochas máficas, apresentando bandamento composicional, ora de forma descontínua, com espessuras centimétricas a decimétricas, por vezes migmatizado (MACÊDO et al., 2014; PIRES, 2016).
- Complexo Rio Salitre – aflora próximo a confluência com o rio São Francisco, no extremo norte da bacia do Salitre, constitui-se por uma sequência vulcano-sedimentar com baixo grau de metamorfismo, contendo principalmente filitos, xistos, metarcosios e

metagrauvacas, além de quartzitos e metavulcanitos máficos e ultramáficos (DALTON DE SOUZA et al., 1979). De acordo com a Figura 5 há afloramentos apenas no baixo curso, mas Auler (1999) admira afloramentos de xistos no fundo do vale em alguns pontos no médio curso do rio Salitre. Em campo foi verificado alguns pequenos trechos, próximos ao leito do rio, com afloramentos dos xistos citados pelo último autor, não tendo sido apontados na base cartográfica utilizada para construção do mapa da Figura 5.

- c) Granitóides das Regiões de Lagoa do Alegre e Rio Salitre - possui monzogranito e sienogranito, em parte foliados ou gnaissificados, calcialcalinos de alto K e metaluminosos (DALTON DE SOUZA et al., 2003).

**II – Mesoproterozóica** - são litologias do Supergrupo Espinhaço, representadas pelo Grupo Chapada Diamantina, especificamente pelas Formações Morro do Chapéu, Tombador e Caboclo (ROCHA, 1992; SILVA, 1994; CASTRO, 2003). Estão associadas às áreas mais elevadas, localizadas nas bordas da bacia, com destaque para as porções sul, sudeste, oeste e noroeste.

- a) Formação Tombador – está na base do Grupo Chapada Diamantina e representa o mais importante marcador estratigráfico do Supergrupo Espinhaço na Bahia, possui contato gradacional com a Formação Caboclo (à cima), contendo metaquartzarenitos, intercalados com metarenitos mal selecionado e a metarenitos finos a médios bem selecionados, com níveis metaconglomeráticos (CASTRO, 2003; GUIMARÃES et al., 2012). Essa formação representa vários ciclos de sedimentação em ambiente continental costeiro, representados por sistemas de leque aluvial, fluvial e eólico, em contexto de nível de mar raso (GUIMARÃES et al., 2012).
- b) Formação Caboclo – com gênese associada principalmente a transgressão marinha, interpretada como depósitos em zonas inter a supramaré de um ambiente lagunar e depósitos em um ambiente litorâneo de sub-maré, predominantemente (SILVA, 1994). Possui fácies diversificadas contendo lamitos, calcarenitos, estromatólitos, siltitos e arenitos (ROCHA et al., 1992).
- c) Formação Morro do Chapéu – está no topo do Grupo Chapada Diamantina, e representa a retomada da sedimentação continental (SILVA, 1994). Corresponde à sequências tabulares de rochas metassedimentares com litofáceis siliciclásticas com cimentos de sílica e óxido de ferro, compreendendo associações de metarenitos, metaconglomerados, metaquartzarenitos com presença de níveis de metasiltitos e metargilitos (GUIMARÃES et al., 2012).

**III – Neoproterozóica** – são representadas pelas rochas do Grupo Una que é parte do Supergrupo São Francisco, com a Formação Bebedouro na base e Formação Salitre no topo. Estão assentadas sobre as rochas do Supergrupo Espinhaço (SOUZA et al., 1993).

- a) Formação Bebedouro – formada a partir de evento glacial, depositado em ambiente deltaico ou marinho, constituindo uma sedimentação plataformal glácio-marinha marginal rasa, contendo diamictitos, arenitos e pelitos (GUIMARÃES, 1996; FIGUEIREDO, 2008). Os diamictitos possuem matriz pelítica e arenítica arcoseana com cimento silicoso, feldspático, óxido de ferro e calcítico, com clastos angulosos e arredondados de composição variável (granitos, gnaisses, migmatitos, pegmatitos, xistos, filitos, rochas básicas/ultrabásicas, quartzos, quartzitos, arenitos, argilitos, carbonatos e cherts) (GUIMARÃES, 1996). Possui fácies de arenitos maciços finos a grossos e arenitos laminados, além de pelitos laminados e maciços (GUIMARÃES, 1996; FIGUEIREDO, 2008). A Formação Bebedouro aflora na porção sudeste da bacia (alto curso) e em diversos pequenos trechos no fundo do vale, próximo ao rio Salitre.
- b) Formação Salitre – é constituída por uma sequência carbonática com pequenas intercalações de rochas terrígenas, com idade entre 850 e 650 Ma, geradas em uma planície de maré sob condições climáticas áridas, composta pelas unidades (com afloramentos na bacia hidrográfica do Salitre): Nova América, formada predominantemente por calcilitos laminados, secundariamente por calcarenitos, e presença marcante de laminitos algais, que indicam a dominância de um ambiente de formação que varia de supramaré a intermaré, em ciclo de sedimentação regressivo; Unidade Gabriel, formado em um contexto ambiental semelhante à unidade anterior, é constituída por calcilitos, calcissiltitos e calcarenito finos, de coloração rosa, creme e cinza claro, com estratificação plano-paralela e ondulada, contendo ainda corpos de dolomito, associados a laminitos algais; Unidade Jussara, depositada em um contexto de águas mais profundas (domínio de ciclo transgressivo), em ambiente submaré e intermaré, formada por calcarenito preto, granulometria grossa, intercalados com calcilitos de cor cinza escuro a negra, além da presença de laminitos algais (PEDREIRA et al. 1985; DOMINGUEZ e LEÃO, 1992; SOUZA et al., 1993; REIS et al., 2018). Para diversos autores, entre eles Moraes Filho et al., (1978); Suguio et al. (1980); Penha (1994); Brito Neves et al. (2012), a Formação Salitre constitui a base dos materiais formadores dos calcretes e tufos da Formação Caatinga, encontrados na área de estudo.

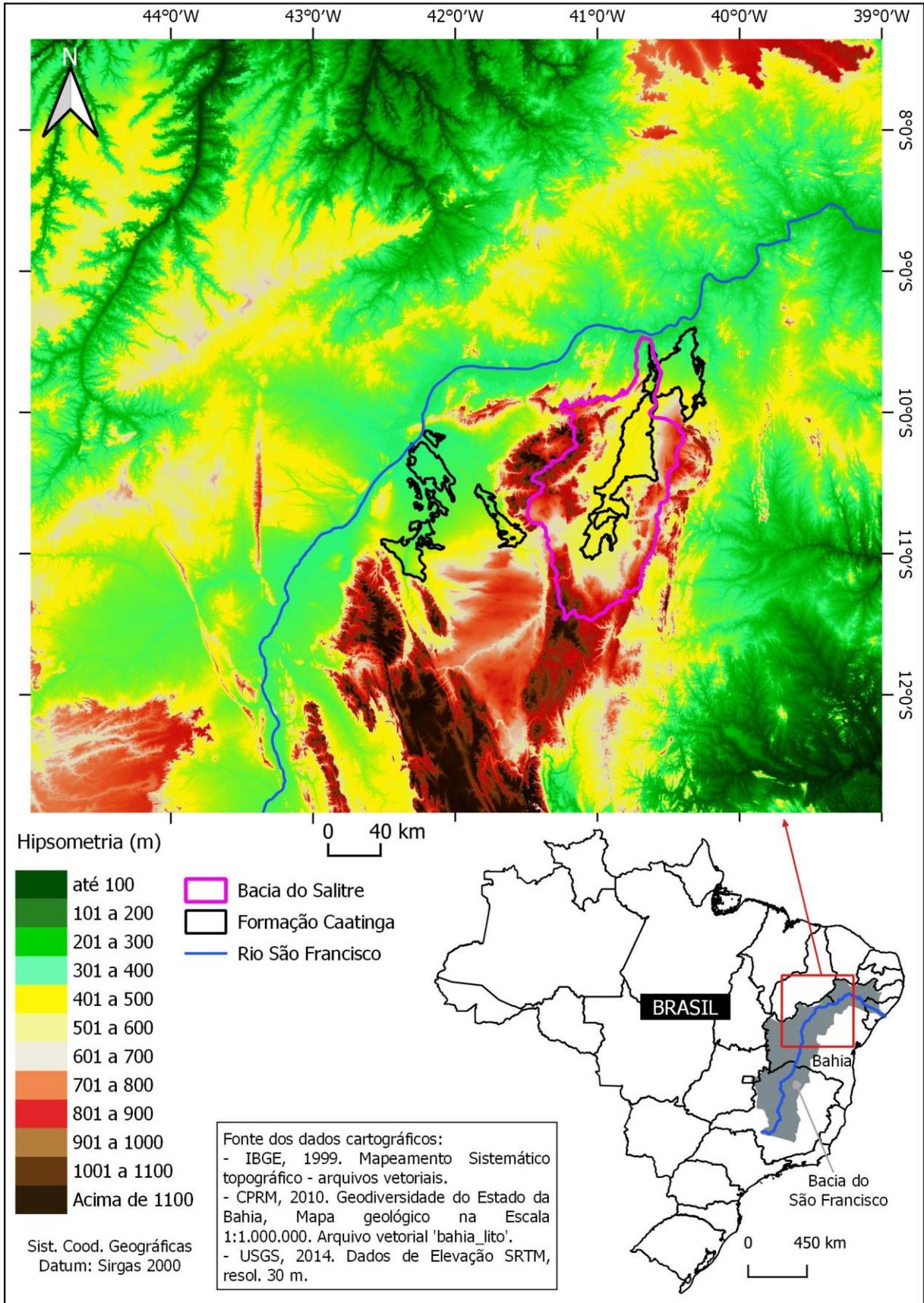
**IV – Paleógeno, Neógeno e Quaternário** – Representada pelas unidades mais recentes que, em conjunto, são espacialmente importantes na bacia, com destaque para a porção central. Predomina nas porções com relevo aplainado. Para Souza et al. (1993) essas coberturas correspondem à depósitos relacionados à fase de agradação dos ciclos Sul-americano e Velhas durante o Paleógeno e Neógeno, e ciclo Paraguaçu durante o Quaternário.

- a) Depósitos detrítico-lateríticos - Com idade associada ao Neógeno (23 a 1,8 Ma), são sedimentos areno-argilosos, finos a médios, em parte cascalhosos, com nódulos arredondados de óxidos de ferro (MACÊDO et al., 2014).
- b) Formação Caatinga – Na bacia do Salitre esta Formação repousa discordantemente sobre o Complexo Rio Salitre, rochas granitóides, Grupo Chapada Diamantina e Grupo Una (Formação Salitre e Bebedouro), possuindo morfologia plana entalhada pela rede de drenagem (DALTON DE SOUZA et al., 1979). A Formação Caatinga será discutida no tópico a seguir.
- c) Coberturas residuais - são sedimentos pleistocênicos, com composição areno-argilosa e argila, podendo conter fragmentos grosseiros e angulosos, localizado no sopé de escarpas (DALTON DE SOUZA et al., 2003).
- d) Depósitos aluvionares recentes - são sedimentos holocênicos com localização restrita à margens do rio Salitre nas proximidades de sua confluência com o São Francisco. São materiais areno-argilosos, restos de matéria orgânica com presença de cascalhos, seixos e matacões (MACÊDO, et al., 2014).

### **1.3.2. A Formação Caatinga**

A área objeto de investigação está sobre a Formação Caatinga, unidade geológica localizada no médio curso da bacia do São Francisco, centro-norte do estado da Bahia, constituindo parte significativa do território da bacia do Salitre. Esta formação está situada entre menos de 600 e mais de 300 metros de altitude (FIGURA 6), com padrão morfológico variando entre o plano e o suave ondulado. A Formação Caatinga está sendo dissecada pelo ciclo erosivo atual (BRITO NEVES et al., 2012), possui idade geologicamente recente, provavelmente no início do Quaternário (AULER, 1999). De acordo com Branner (1911), pioneiro nos estudos sobre os calcários da Formação Caatinga, esse calcário é de origem recente, representando a última grande série de rochas formadas no vale do Salitre, sendo derivados de outros calcários que existiram anteriormente (correspondentes à Formação Salitre). O referido autor afirma que os processos de formação destas rochas ainda estão em desenvolvimento.

Figura 6 - Localização da Formação Caatinga no Brasil e o contexto hipsométrico regional.



Suguio et al. (1980) afirmam que a Formação Caatinga possui calcários nodulares, de cor creme, compactos e sem estratificação, ao lado de calcários frequentemente friáveis a pulverulentos de cor branca a creme claro, sendo que ambos podem possuir espessura média de 20 m, variando entre 0 e 50 m e excepcionalmente 80 m, com origem ligada à água doce em ambiente continental, provavelmente durante o Quaternário. Os mesmos autores sugerem que a Formação Caatinga constitui depósitos de caliche (calcrete), e que a origem continental é indiscutível, tendo em vista a evolução geológica regional, os fósseis encontrados (algas, gastrópodes e lamelibrânquios) e a idade dos sedimentos.

A gênese dos calcários da Formação Caatinga estaria associada à dissolução e reprecipitação dos calcários neoproterozóicos do Grupo Una, mais especificamente da Formação Salitre (BRANNER, 1911; MORAES FILHO et al., 1978; SUGUIO et al., 1980; PENHA, 1994; BRITO NEVES et al., 2012).

Estudos desenvolvidos por Penha (1994), especificamente em um perfil no município de Ouro-lândia-BA, sul da bacia do Salitre, apontam a ocorrência de calcrete do tipo poligênico, formado por processos pedogenéticos e variação do nível freático. Segundo a autora, feições diagnósticas de calcrites pedogenéticos foram encontradas nas porções superiores (até aproximadamente 15 metros de profundidade) com maior concentração de carbonato de cálcio e maior atividade orgânica do solo, e nas porções inferiores foram encontradas feições de calcrete freático (até a profundidade de aproximadamente 30 metros) com predominância de horizontes nodulares, maciços e com maior teor de sílica. Daí a expressão calcrete poligênico para os calcários da Formação Caatinga.

O reconhecimento da Formação Caatinga como calcrete também está presente nos trabalhos de Branner (1911); Suguio et al. (1980); citado também nos trabalhos de Pedreira et al. (1985); Brito Neves et al. (2012); Borges et al. (2016), entre outros.

Auler (1999) propõe que o calcário da Formação Caatinga é uma sequência palustre, com gênese associada a um ambiente de sedimentação em áreas continentais alagadas, semelhante a pântanos. Um dos argumentos utilizados pelo autor diz respeito às afirmações de Mabeoone et al. (1977) sobre um episódio de barramento do rio São Francisco ocorrido durante a Glaciação de Mindel (entre 580 e 450 mil anos), que causou elevação significativa no nível freático, criando vários lagos rasos nos quais o Calcário Caatinga teria sido depositado.

Vale acrescentar que o ambiente deposicional nos quais os calcários palustres se acumularam revela-se bastante complexo, atrelado às condições subaéreas, influenciados pelas flutuações sazonais do freático, capazes de produzir diversas características morfológicas nos materiais, numa amplitude faciológica transicional, desde aspectos atrelados a processos

pedogenéticos (calcretes) até próximo de ambientes completamente alagados (carbonatos lacustres) (ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010b).

Auler (1999) afirma que a gênese do Calcário Caatinga poderia ser explicada a partir de uma só fase, associada a um ambiente climático mais úmido que a condição atual, não necessitando se formar a partir do antigo calcário do Grupo Una (Formação Salitre). O mesmo autor acrescenta que além dos calcários palustres, há presença de duas outras unidades carbonáticas distintas, independentes, e bem mais recentes do que o calcário da Formação Caatinga. Uma dessas unidades é constituída por depósitos evaporíticos recentes (precipitação de calcita), isto é, acumulações de areias carbonáticas geradas pela evaporação de águas carregadas em  $\text{CaCO}_3$ . A outra unidade é composta por tufos calcários ou travertinos meteógenos, depositados por águas saturadas em carbonato de cálcio, sobre o leito de antigos tributários do rio Salitre, e que representam uma época de maior umidade que a do clima semiárido atual. Estão localizados em forma de pequenos sítios, em alguns pontos próximos ao leito do Salitre, entre as comunidades de Salgadinho e Abreus no município de Campo Formoso-BA (AULER, 1999).

Brito Neves et al. (2012) também citaram a ocorrência destes tufos carbonáticos nas proximidades da comunidade de Aurora, também no município de Campo Formoso, contendo muito restos vegetais e estruturas estromatolíticas, destacando o significativo valor desse material enquanto registro de exalações de águas carbonáticas, clima mais úmido e quietude tectônica.

#### **1.4. Solos**

Em relação aos solos, poucos estudos foram realizados nesta área, com poucos dados sobre as particularidades pedológicas no local. Naime et al. (2007) desenvolveram trabalho de levantamento/reconhecimento nas proximidades do baixo Salitre, no município de Juazeiro, encontrando CAMBISSOLOS HÁPLICOS Eutróficos, NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos, NEOSSOLOS REGOLÍTICOS Eutróficos, PLANOSSOLOS HÁPLICOS e VERTISSOLOS HÁPLICOS, todos associados à Formação Caatinga. Em condições geológicas, topográficas e climáticas bastante semelhantes às verificadas no médio Salitre, Paiva (2010) no Platô de Irecê – BA (sudoeste do alto curso do Salitre) realizou estudos de levantamento/reconhecimento com foco nos solos carbonáticos, e indicou a predominância de CAMBISSOLOS HÁPLICOS Eutróficos sobre a Formação Caatinga. Cunha e Ribeiro (1998), na mesma região, também indicaram a predominância de Cambissolos eutróficos sobre os calcários do Grupo Bambuí

(Grupo Una) no platô de Irecê. Carlini (2013) realizou trabalho de reconhecimento pedológico na sub-bacia do Pacuí (afluente do Salitre), encontrando CAMBISSOLOS HÁPLICOS Eutróficos e CAMBISSOLOS HÁPLICOS Carbonáticos. Embrapa (2006) e Cunha et al. (2008), em trabalhos de levantamento exploratório, também reconhecem a ocorrência dos Cambissolos no Vale do Salitre. O caráter eutrófico, na maior parte dos solos citados, indica alta saturação por bases e elevado potencial nutricional, dominado pelo cálcio no complexo sortivo.

De forma geral, as coberturas pedológicas apresentadas, associadas à Formação Caatinga, indicam que a área delimitada para estudo possui solos com baixo grau de desenvolvimento e pedogênese pouco avançada, com expressivas características herdadas do material de origem.

### **1.5. Clima, Vegetação e Hidrografia**

De acordo com Bahia (2003); Medeiros e Gonçalves (2003) para esta região do médio Salitre o índice pluviométrico está entre 300 e 500 mm/ano, posicionada no interior de um polígono mais restrito dentro da região semiárida do Brasil, notadamente mais seco, com chuvas que ocorrem concentradas principalmente nos meses do verão. Nestas áreas do semiárido brasileiro, além do baixo índice, há má distribuição das chuvas com marcante irregularidade temporal (SILVA et al. 2010; MARENGO et al., 2011), sendo geralmente precipitações intensas e concentradas em poucos dias do ano, seguidas de meses de estiagens, praticamente todos os anos.

As temperaturas possuem média de 27°C e elevado potencial de evapotranspiração, em torno de 1890 mm/ano, de acordo com dados da Estação Meteorológica Salitre, entre os anos de 2013 e 2019 (EMBRAPA, 2020). Para Bahia (2003); Medeiros e Gonçalves (2003) as temperaturas nos médio e baixo cursos são as maiores da bacia do Salitre e o potencial de evapotranspiração atinge valores acima de 200 mm mensais, não existindo excedente hídrico durante o ano, salvo raras exceções. Pelas citadas características, a região se enquadra, dentro da classificação climática de Köppen-Geiger, como BSh, isto é, clima semiárido quente.

A vegetação dominante é a caatinga, que se estende por quase toda bacia do Salitre. A caatinga é do tipo hiperxerófila de formação caducifólia espinhosa, seu porte é predominantemente arbustivo-arbórea (NAEMI et al., 2007).

Dias e Kiill (2008), em estudo sobre levantamento florístico da Reserva Legal do Projeto Salitre no município de Juazeiro, apontaram para presença de caatinga arbóreo-arbustiva aberta, de menor densidade e com menor porte, e caatinga arbóreo arbustiva fechada, com maior

densidade e maior porte, além da caatinga gramíneo-lenhosa, onde apesar da presença de indivíduos lenhosos (árvores e arbustos), há o predomínio de gramíneas. Os autores afirmam que na Reserva Legal do Projeto Salitre foram registradas 125 espécies, pertencentes a 99 gêneros e a 43 famílias botânicas, informações que confirmam a importância desse bioma na região.

Carlini (2013) estudando uma sub-bacia do Salitre (Pacuí) apontou que em 45% das áreas próximas ao rio Pacuí houve remoção total da cobertura vegetal nativa, e chama a atenção para o elevado nível de antropização de toda área, com paisagens de caatinga raleada, por desmatamento e principalmente sobrepastoreio. A paisagem do Pacuí possui significativa semelhança com as áreas nos médio e baixo cursos do Salitre.

Em praticamente toda drenagem da bacia do Salitre o fluxo superficial de água desaparece após a estação de chuvas, constituindo uma característica marcante na sua hidrografia, em grande parte formada por canais efêmeros, que apresentam fluxo de água somente nos curtos períodos chuvosos. Esse caráter de intermitência na hidrografia da bacia do Salitre é destacado por Bahia (2003); Bahia (2017); Medeiros e Gonçalves (2003); Oliveira, et al. (2010). Há pequenos trechos com fluxo perene das águas superficiais, com destaque para os últimos 20 km do rio Pacuí, que flui para o rio Salitre (CARLINI, 2013).

Em relação ao rio Salitre, as informações sobre vazão são escassas devido ao número reduzido de pontos de monitoramento e as falhas temporais na aquisição de dados (MEDEIROS e GONÇALVES, 2003). A estação fluviométrica de Abreus está no extremo norte da área de estudo, e de acordo com os citados autores possui uma vazão média mensal de 0,77 m<sup>3</sup>/s. Para Bahia (2003) a vazão da bacia do Salitre, medida no exutório do rio principal, é a menor do estado da Bahia, mas a característica mais marcante é o longo período de intermitência de suas águas, que pode ultrapassar os 12 meses com vazão zero.

## 2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 2.1. A perspectiva multiescalar

Para atingir os objetivos propostos foi necessário investigar os solos e sua interação com o relevo local e a morfodinâmica atual, os quais integram uma paisagem marcada pela intensa degradação dos solos (principalmente erosão linear), que, no contexto do semiárido, pode gerar características de uma área em desertificação. Optou-se por uma investigação multiescalar com foco na caracterização dos materiais e dos processos atuantes, tangenciando desde abordagens regionais até interações microscópicas na perspectiva da escala espacial, além da escala temporal, que destaca testemunhos e heranças de distintas condições pedogeomorfológicas pretéritas que influenciaram na composição da paisagem atual. A investigação multiescalar acerca dos materiais seguiu concepção idealizada por Ruellan et al. (1989) para estudo da cobertura pedológica.

Os estudos foram desenvolvidos segundo quatro diferentes níveis de organização dos materiais, desde o arranjo das minúsculas partículas até a unidade da paisagem. O nível 1, denominado por Ruellan et al. (1989) de “organizações elementares”, é caracterizado pelos volumes pedológicos que reúnem seus constituintes, sendo alguns visíveis a olho nu, como poros, revestimentos, nódulos, traços de atividades biológicas, além de organizações em nível hierárquico inferior, como por exemplo, os elementos formadores de nódulos, concentrações ferruginosas ao redor de nódulos, entre outros, além de agregados elementares ou *ped* (CASTRO e COOPER, 2019). O nível 2, denominado por Ruellan et al. (1989) de “assembleias”, ou “arranjo de conjunto” (CASTRO e COOPER, 2019), é representado por um conjunto de organizações elementares, como por exemplo, as assembleias cálcicas. O nível 3, formado pelos “horizontes” ou camadas, é representado por uma ou mais assembleias, organizadas mais ou menos paralelas à superfície, com espessura bastante variável e extensão lateral que varia entre a escala métrica a alguns quilômetros, com limites passíveis de serem definidos na paisagem. O nível 4, corresponde ao “sistema pedológico”, no qual os horizontes estão organizados entre si, tanto do ponto de vista vertical como lateral, na escala da unidade de relevo (RUELLAN et al., 1989).

Esta concepção permite conectar fenômenos distintos que ocorrem em diferentes escalas de observação, mas que se manifestam de forma integrada. Assim, por exemplo, o processo de calcificação, detectável ao se investigar amostras de materiais (análise química e micromorfológica) está diretamente relacionada às concreções carbonáticas ou eflorescências

de  $\text{CaCO}_3$  visualizadas no perfil do solo e os horizontes cálcicos/petrocálcicos identificados ao longo da vertente, que na escala da paisagem contribuem para caracterização de solos vulneráveis à erosão (Quadro 1).

Quadro 1 – Relação entre o nível de organização dos materiais, a escala de observação e os processos na área de estudo.

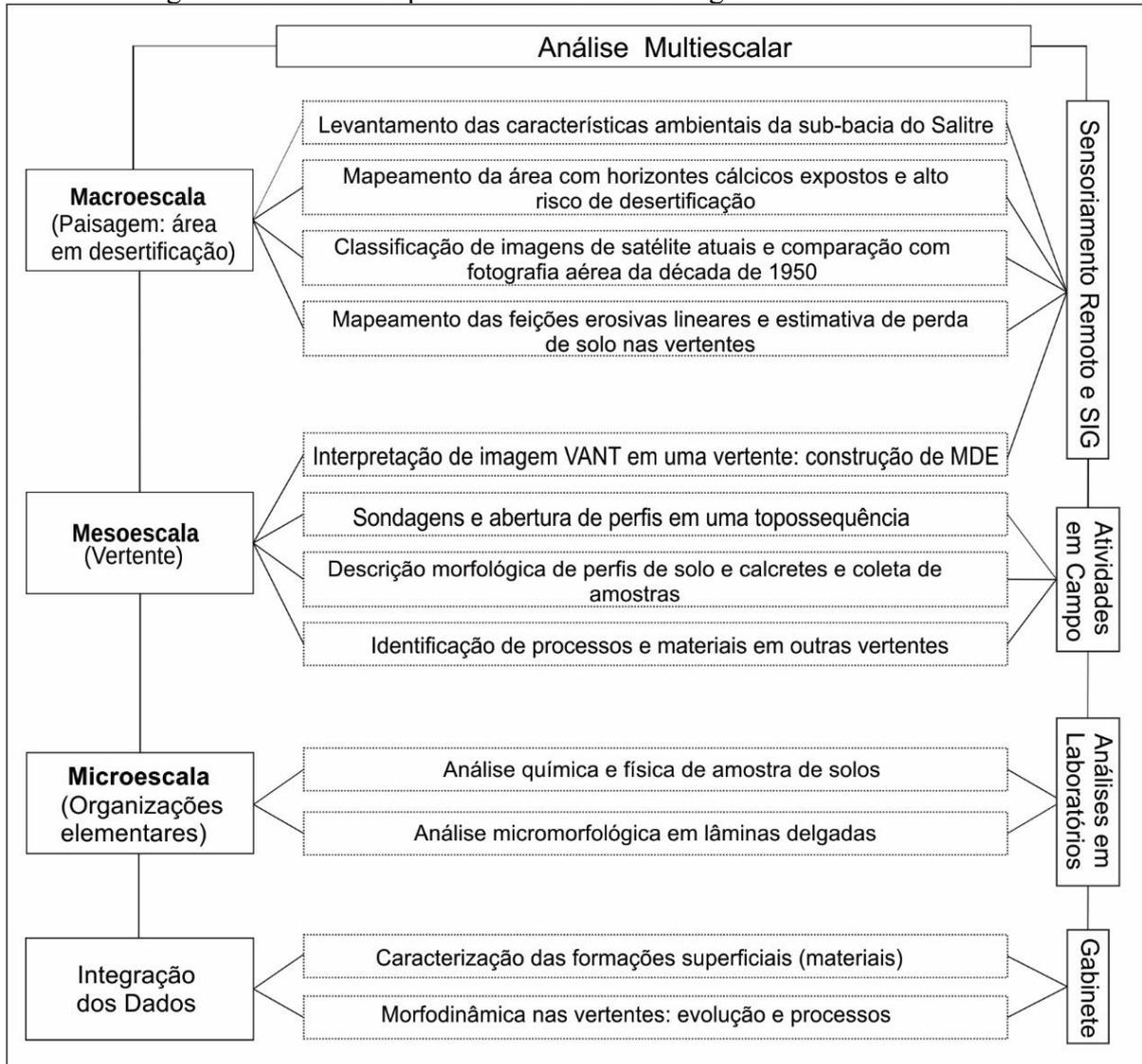
Nível de organização dos materiais	Escala de observação	Exemplos de processos observados na área de estudo
1 - Organizações elementares	Micropartículas ao perfil do solo	Calcificação; dissolução; recalcificação; revestimentos; formação de nódulos; outros
2 – Assembleias ou Arranjo de Conjunto	Perfil do solo	Eflorescências de $\text{CaCO}_3$ ; Formação de horizontes cálcico/petrocálcico/calcretes; outros
3 - Horizontes / Camadas	Vertentes	Formação/evolução de horizontes cálcicos/petrocálcicos/calcretes; movimentação de materiais na vertente; erosão; outros.
4 – Sistemas pedológicos	Paisagem	Gênese e transformação lateral dos solos calcíticos; erosão; recuo das vertentes; entulhamento dos canais; desertificação; outros.

A escala temporal é resguardada a partir da confecção de um modelo evolutivo da área em uma temporalidade dentro do Quaternário, principalmente do Quaternário tardio, determinante na compreensão das condições morfodinâmicas atuais. Foi utilizado referencial teórico sobre paleoclimas na área pesquisada, associado à interpretação de imagens de satélite e VANT, análises químicas e micromorfológicas dos materiais e interpretação da paisagem em campo.

Nesta abordagem em múltiplas escalas foram realizados distintos procedimentos, os quais incorporaram várias técnicas, desde o sensoriamento remoto (SR) para uma investigação espacial mais ampla, passando por uma abordagem na escala da vertente (com intenso trabalho de campo) para efetiva investigação dos materiais e verificação de processos, ocorridos a partir da coleta de amostras de solo e descrição morfológica de perfis em topossequência, até métodos de análise química, física, mineralógica e micromorfológica de amostras dos materiais (solos, sedimentos e rochas) numa abordagem na microescala.

A Figura 7 apresenta uma síntese dos procedimentos e técnicas utilizados na condução do trabalho, e, de forma geral, como essas práticas se integram visando a compreensão sobre a composição e dinâmica da paisagem no médio curso da bacia do Salitre, no semiárido baiano.

Figura 7- Síntese dos procedimentos metodológicos e técnicas adotados.



A seguir serão detalhados os procedimentos, técnicas e recursos utilizados na pesquisa, separadamente organizados em subtópicos.

## 2.2. Detalhando as técnicas e os procedimentos: práticas de campo, gabinete e laboratório.

### 2.2.1. Levantamento de dados socioambientais da bacia do Salitre: informações gerais em fontes secundárias.

#### I - Foco na morfologia, geologia e pluviosidade

Foi realizado o levantamento de dados ambientais sobre clima, cobertura vegetal, hidrografia e solos da bacia hidrográfica do rio Salitre. Foram gerados produtos cartográficos

do relevo (MDE) e geologia (unidades litoestratigráfica), com destaque para a Formação Caatinga, e informações mais detalhadas sobre a pluviosidade na bacia. Os produtos cartográficos foram confeccionados no Software Quantum Gis 2.18 (QGIS), convertidos em arquivos SHP (Shapefile) ou Raster, de acordo com o produto, tendo fontes e procedimentos apontados abaixo:

- Mapa geológico da bacia do Salitre: foram utilizadas informações digitais (arquivos vetoriais) do Mapa Geológico do Estado da Bahia na escala de 1:1.000.000 (DALTON DE SOUZA et al., 2003), bem como vetores (hidrografia e outros) do projeto Geodiversidade do Estado da Bahia, disponibilizados pela CPRM, em escala de 1:1.000.000. Foram importantes também informações extraídas dos mapas: Carta Geológica, Folha SC.24-V-C-VI (Campo dos Cavalos) Escala 1:100.000; Carta Geológica Brejão da Caatinga, Folha SC.24-Y-A-III. Escala 1:100.000.

- Mapa do Relevo (Modelo Digital de Elevação): O MDE foi confeccionado a partir de informações da Missão Espacial SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)<sup>1</sup> com dados altimétricos capazes de produzir, com relativa precisão, dados hipsométricos e curvas de nível com equidistância de 30 metros. Foi efetuado download no site <https://earthexplorer.usgs.gov/> de uma cena SRTM, capaz de cobrir toda extensão da bacia do Salitre. Em seguida, no software QGIS, foi realizada transformação (recodificação) de um raster contínuo (SRTM) em um raster discreto (mapa hipsométrico), acrescido de raster de relevo sombreado, utilizando o algoritmo “**r.recode**”. Após essa etapa, além do mapa hipsométrico, foram editados mapas de declividade e relevo sombreado, usando a ferramenta “Análise do Terreno” do QGIS e perfis topográficos de alguns transectos na bacia, usando a ferramenta “Terrain Profile”. Também foram confeccionadas curvas de nível (transformação de raster em vetores), com equidistância de 15 metros (interpolação) utilizando a ferramenta “Extrair Contorno”.

- Dados meteorológicos: Os dados foram levantados no Portal Hidroweb, com link de acesso <http://hidroweb.ana.gov.br>, gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Esses dados integram o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que oferece acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados pluviométricos e fluviais. Levantou-se

---

<sup>1</sup> A Missão STRM foi desenvolvida Pelos Governo dos Estados Unidos, especificamente pela National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA). Os dados SRTM produziram um banco de dados digitais necessários para elaboração de Modelo Digital de Elevação (MDE) das terras continentais em todo planeta (EMBRAPA, 2019). Atualmente os dados são distribuídos em formato raster, pelo United States Geological Survey (USGS), disponíveis no site <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

informações sobre a pluviosidade, contemplando médias diárias, mensais e anuais, em diferentes séries históricas, em 09 estações pluviométricas dentro da bacia do Salitre (foco no entorno da área de estudo). As estações utilizadas e seus respectivos códigos foram: Abreus-1 (01040001); Abreus-2 (01040028); Fazenda Panelas (01040008); Junco-1 (00940015); Junco-2 (00940028); Laje dos Pretos (01040007); Lajes (01040036); São Tomé (01040000); Ouroândia (1041013). Para os dados de temperatura e evapotranspiração utilizou-se informações da Estação Automática Salitre, gerenciada pela Embrapa Semiárido (EMBRAPA, 2020). Os dados foram tratados no software Excel e a cartografia digital no software QGIS.

## **II - Foco nas principais atividades econômicas, analfabetismo e renda das famílias.**

Os dados socioeconômicos serviram de base para apontar a tipologia de uso e as condições de pobreza instaladas na bacia do Salitre, e mais especificamente no entorno do compartimento dfv. Estes parâmetros foram importantes na caracterização do possível processo de desertificação na área.

Informações bibliográficas sobre a formação espacial no médio Salitre foram levantadas e constituíram elementos delimitadores das formas de ocupação e tipos de uso do solo. Dados obtidos, principalmente do IBGE (2010; 2020), com foco nos setores censitários capazes de abarcar a referida área no médio Salitre (códigos dos setores no IBGE: 290600615000008; 290600605000040; 290600605000043; 290600605000066) e no município de Campo Formoso foram sintetizados através de gráficos, confeccionados no software Excel.

Além disso, foram realizadas entrevistas informais (GIL, 2008) com 10 moradores das comunidades de Saquinho, Salgado, Lagoa Branca, Taboa e Poço da Pedra, buscando contribuir na validação das alterações observadas nas imagens de satélite e na pesquisa bibliográfica, além de obter novas informações sobre as dinâmicas e tipologias de uso, que foram importantes nas discussões promovidas nesta tese. Foram selecionadas pessoas que residem há muito tempo em cada localidade (mais de 4 décadas), e que estavam disponíveis para a entrevista.

### **2.2.2. Delimitação da área com horizontes cálcicos expostos (solos), correspondente ao compartimento dfv, no médio curso da bacia do Salitre.**

A delimitação foi através da digitalização (vetorização) dos limites espaciais representados por solos com horizontes cálcicos expostos, apresentados por tonalidades claras (branco ao cinza claro) em uma imagem CBERS-4 (Sensor Pancromático com 5m de resolução espacial, datada de 16 julho de 2019 (INPE, 2020) sobreposta a um Modelo Digital de Elevação

(MDE) confeccionado a partir de informações SRTM de 30m (USGS, 2014). Este procedimento foi realizado no software QGIS 2.18, com supervisão de algumas imagens de satélite de alta resolução espacial: Ikonos-2 (1 m - datada de 09 de agosto de 2014); WorldView-2 (0,50 cm - datada de 14 de maio de 2015); e imagens do Bing Satellite (disponibilizada no QGIS, complemento Quick Map Services). Esta delimitação é representada na Figura 8.

Figura 8 - Imagens representando exemplo (em um pequeno recorte) do trabalho de delimitação da área com horizontes cálcicos expostos, localizado médio curso da bacia do Salitre no município de Campo Formoso-Bahia.

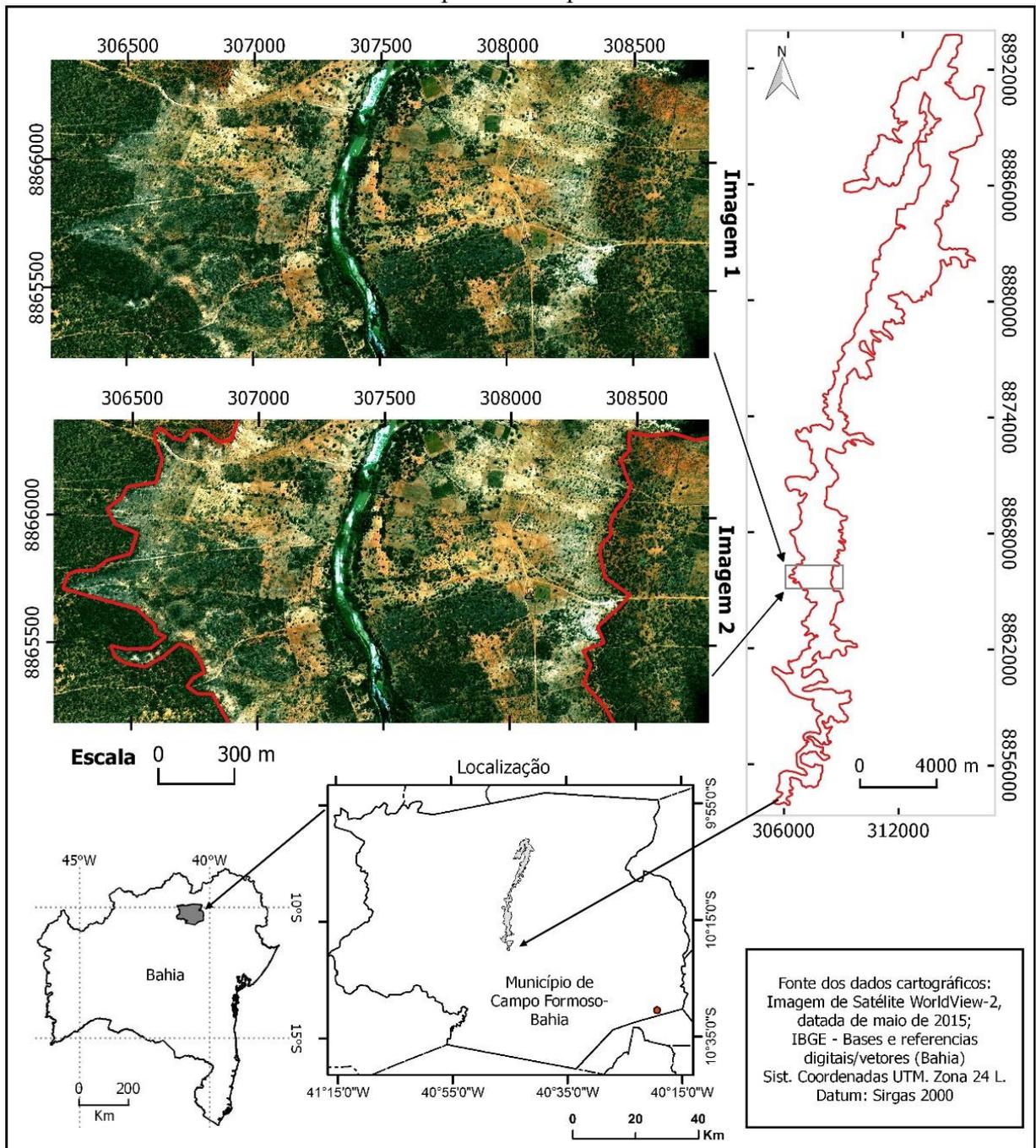


Imagem 1: Imagem do Satélite WorldView-2 em maio de 2015. Imagem 2 – Mesma Imagem 1 com linha vermelha, delimitando a área. Mapa à direita (em vermelho) representa toda a área.

Para validação da delimitação, foi realizada visita ao campo com georreferenciamento das extremidades da área, utilizando receptor GPS de navegação e máquina fotográfica. Também foram reconhecidas em campo as principais tipologias de feições erosivas, utilizando procedimentos simples de identificação (ZUQUETTE et al., 2007). Visando confirmar determinadas semelhanças pedogeomorfológicas em toda área, foram realizadas em campo (em diversos pontos):

- Análise morfológica nas paredes feições erosivas lineares e vertentes, apontando a existência de fendilamentos, presença de nódulos carbonáticos, além das cores dos materiais.
- Testes em amostras dos solos, utilizando solução de HCl 10% para verificar efervescência “forte” nos materiais, possibilitando confirmação da exposição de solos com forte presença de carbonatos, de acordo com Santos et al. (2013).
- Verificação de feições erosivas e cicatrizes de movimentos de massa.
- Transectos oeste-leste, com GPS de Navegação, visando comparação morfológica das vertentes.

O trabalho de delimitação foi crucial para o estabelecimento da área de estudo nesta pesquisa, destacando que o interior do polígono delimitado, além de constituir uma área deprimida em relação a um platô no entorno, expõe solos com horizontes esbranquiçados e marcas visíveis da ampla ação erosiva.

### **2.2.3. Classificação/interpretação de imagem de satélite atual e fotografias aéreas da década de 1950: expansão das áreas com solos expostos**

A exposição dos solos e a distribuição da cobertura vegetal foram avaliados numa área representativa que abrange ambos os compartimentos, pc e dfv, delimitada entre as comunidades de Saquinho e Salgado, totalizando 87,5 km<sup>2</sup>. Esses aspectos foram analisados em dois momentos, 1950 e 2019, compreendendo alterações na condição da superfície em quase 70 anos. Para 2019 foi utilizada a classificação supervisionada pixel a pixel pelo método da Máxima-Verossimilhança (MENESES e SANO, 2012) de uma imagem CBERS-4 (Sensor Pancromático com 5m de resolução espacial, datada de 16 julho de 2019, período inicial da estação seca) no ambiente do software QGIS 2.18, organizada em duas classes: solo exposto e cobertura vegetal.

De acordo com Novo (2008), a técnica da classificação supervisionada para a confecção de mapas consiste na extração de amostras de pixel para auxiliar o software a interpretar a imagem de forma automática e se baseia no pressuposto de que cada classe espectral pode ser descrita a partir de amostras fornecidas pelo analista. Para finalizar a confecção do mapa de cobertura vegetal e exposição dos solos de 2019, foram realizadas visitas em campo foram realizadas para validação do processo de classificação e identificação de determinados usos, além de registro fotográfico.

Para o ano de 1950, foram utilizadas fotografias aéreas na escala 1:25.000, registradas com nomenclatura “D / VOO 0-46-B / FI 184”, em escala de 1:25.000, correspondente à folha topográfica Brejão da Caatinga, agregada aos arquivos da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba - CODEVASF e disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM (SUVALE, 1953). A interpretação foi realizada por estereoscopia em pares de fotografias (LOCH, 2001), em que se procedeu com a detecção, reconhecimento e identificação, levando-se em consideração a forma, sombra, tamanho, tonalidade, declividade e posição dos objetos visualizados. Posteriormente, as fotografias foram digitalizadas e classificadas seguindo o mesmo método e as mesmas classes descritas no primeiro parágrafo. Este procedimento foi realizado com supervisão de Imagens Ikonos-2 (1 m - agosto de 2014); WorldView-2 (0,50cm – maio de 2015); e imagens do Bing Satellite. Um Modelo Digital de Elevação confeccionado a partir de informações SRTM de 30m (USGS, 2014), também no QGIS, foi utilizado como base altimétrica.

Adicionalmente, fotografias aéreas de 1964 na escala de 1:60.000 (ACGS, 1964) foram consideradas para ampliar a discussão, mesmo não sendo incluídas na análise quantitativa, devido a incompatibilidade de escala.

#### **2.2.4. Mapeamento das feições erosivas lineares e estimativa de perda de solo**

Para realizar esta etapa da pesquisa várias técnicas foram empregadas, inicialmente usando técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas – SIG, seguida de atividade de campo para averiguações e coleta de dados e, por fim, tratamento estatístico convencional e simulação utilizando o método de Monte Carlo, visando a confecção de um mapa detalhado das linhas de feições erosivas lineares, e sequencialmente estimar perda de solos geradas pelas citadas cicatrizes erosivas. O Quadro 2 sintetiza os procedimentos utilizados, que serão detalhados a seguir.

Quadro 2 – Síntese da sequência de procedimentos utilizados para o mapeamento das Feições Erosivas Lineares – FELs e estimativa de perda de solo nas vertentes.

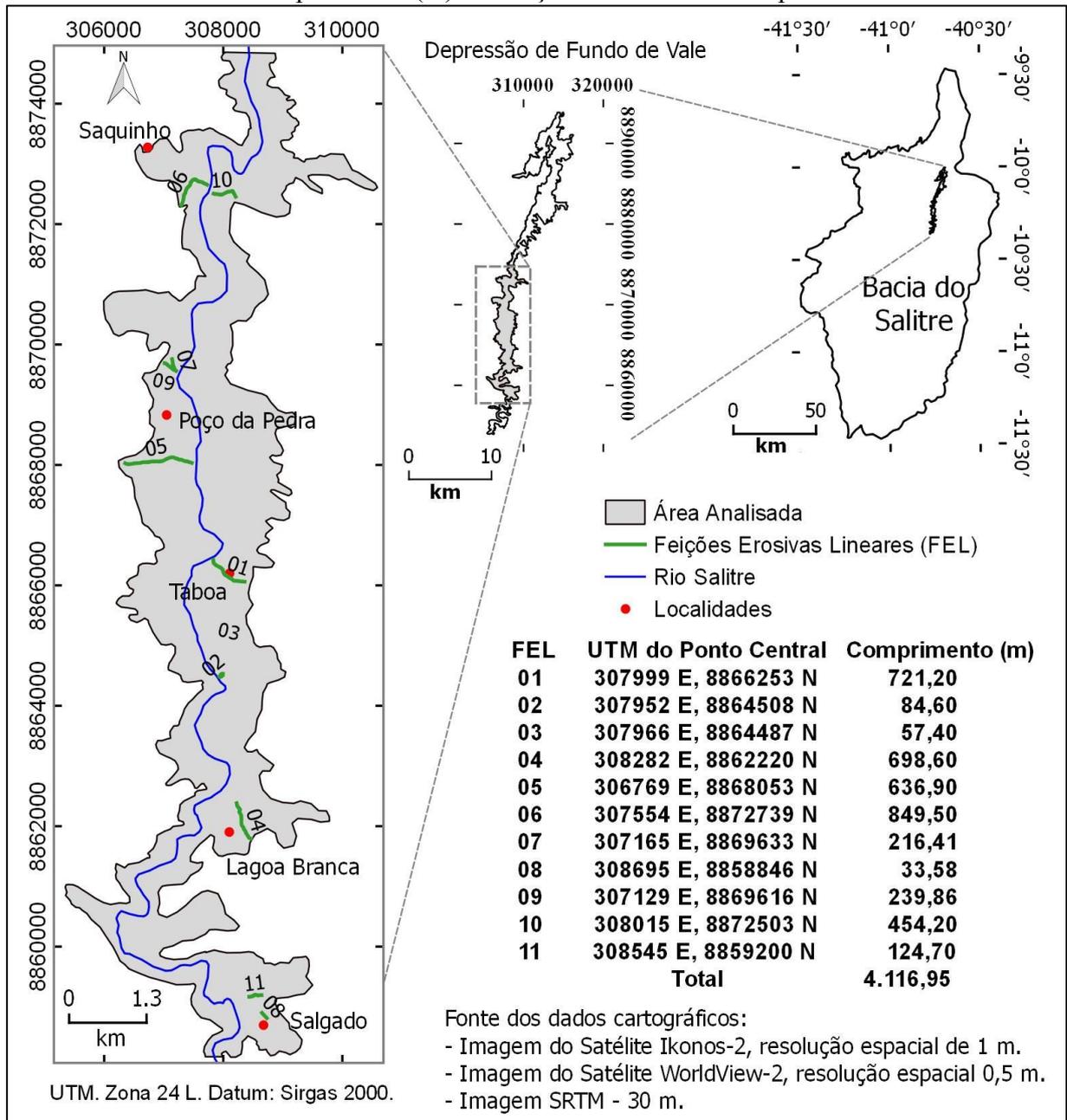
<b>Procedimentos (síntese)</b>	<b>Ambiente</b>
Preparação de imagem de satélite de alta resolução.	Software Quantum Gis (QGIS)
Vetorização de FELs visualizadas e confecção de mapa.	
Sistematização das extensões (comprimentos) das FELs.	Software Excel
Seleção de amostras representativas de FELs para medição em campo.	Software Quantum Gis (QGIS)
Mensuração das larguras, profundidades, e identificação das formas das FELs.	Atividade em Campo
Sistematização dos dados de largura, profundidade e forma - Probabilidade de ocorrência.	Software Excel
Simulação de Monte Carlo - perda de solo nas vertentes por erosão linear.	Fortran

De posse das imagens Ikonos-2 e WorldView-2, datadas em períodos do ano com condições de umidade bastante distintas, sendo a primeira correspondente ao início do período seco do ano de 2014, e a segunda no final do período chuvoso do ano de 2015, procedeu-se inicialmente com os ajustes de realce e a digitalização de vetores de linhas sobre todas as feições erosivas lineares visualizadas nas imagens, no ambiente do Software QGIS 2.18.

A interpretação através de dois sensores distintos foi importante em pontos de cobertura de nuvens e para sanar dúvidas quanto a forma e direção das linhas. Adotou-se como metodologia a interpretação utilizando os elementos primários (localização, tom/cor), e os elementos secundários (tamanho, forma e textura), entendendo as feições erosivas como fenômenos que se apresentam a partir de linhas contínuas que se destacam na imagem, principalmente pelas diferenças na coloração, tonalidade, textura e forma. Canais erosivos pequenos e sem continuidade ao longo da encosta não foram considerados (não sendo vetorizados), devido ao limite de resolução espacial das imagens. Nessa etapa, as informações sobre a localização, quantidade e comprimento das linhas erosivas foram extraídas diretamente pelo QGIS, que também serviram de base para os cálculos da densidade espacial das feições erosivas lineares e das perdas de solo pelo processo erosivo linear.

Para validação da digitalização foram realizados dois dias de visitas em campo (usando GPS de navegação e máquina fotográfica) com reconhecimento e verificações em diversos pontos, ocorrendo entre a localidade de Salgado, na porção sul das imagens até a comunidade de Saquinho, na porção central da dfv (FIGURA 9). Esta etapa foi importante na mensuração da quantidade e extensões (comprimentos) das feições erosivas em toda a área, que serviram de base para a estimativa de perda de solo nas vertentes.

Figura 9 - Área delimitada para mapeamento das feições erosivas lineares e estimativa de perda de solo (trecho sul da dfv) no médio curso da bacia do Salitre, e localização e comprimentos (m) das feições medidas em campo.

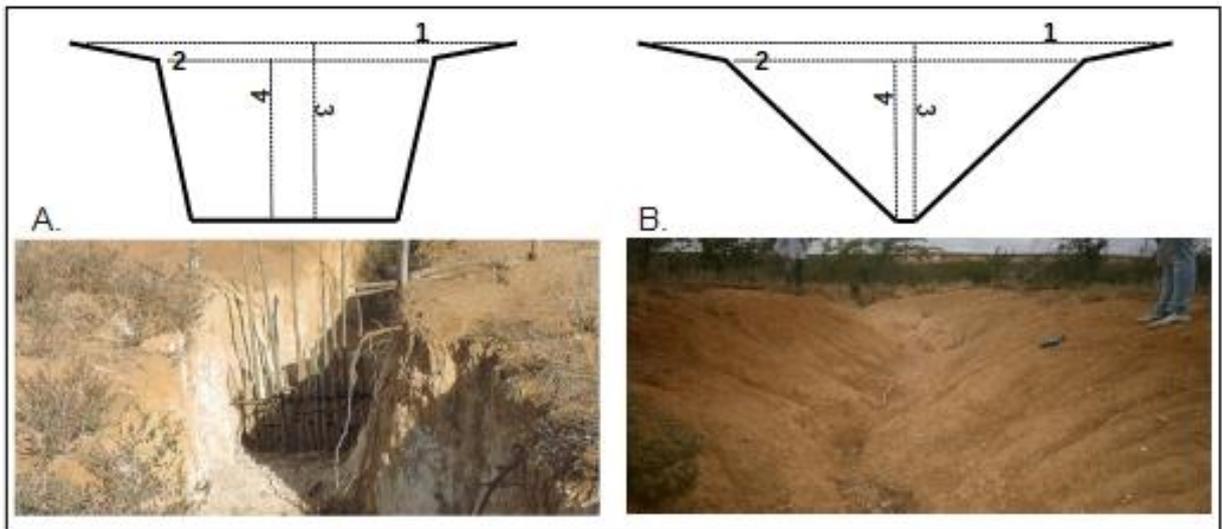


A próxima etapa constituiu na seleção aleatória de 11 feições erosivas (distribuídas na área) com a apresentação na Figura 9 de suas respectivas extensões (comprimentos) para mensuração em campo das variáveis largura, profundidade e forma. Estas feições representaram 1,26% (quantidade de linhas) e 2,83% (comprimento) do total encontrado no trabalho de interpretação das imagens de satélite.

As variáveis medidas nas feições erosivas para estimativa da perda de solo foram (FIGURA 10): (i) largura a partir de pontos extremos da ravina/voçoroca (Largura Maior - LM);

(ii) largura a partir de pontos no interior da ravina/voçoroca (Largura Menor - LN); (iii) profundidade a partir de LM (PLM); (iv) profundidade a partir de LN (PLN); (v) forma. As variáveis foram medidas em intervalos de 15m ao longo das 11 feições erosivas, correspondendo a 201 pontos medidos em campo. Cada local de tomada de medida das variáveis formou um ponto de amostragem que foi georreferenciado com GPS de Navegação. A largura e profundidade foram medidas seguindo um corte transversal ao comprimento da incisão no solo. Realizou-se uma interpretação visual e registro fotográfico, para determinar se as paredes das incisões apresentavam uma forma de U (paredes próximas de 90°) ou forma de V (paredes inclinadas). A Figura 10 ilustra as medidas das variáveis nos pontos de amostragem.

Figura 10 - Ilustrações e fotos das tipologias de formas das feições erosivas encontradas nas proximidades da comunidade rural de Taboa.



A = incisão linear em forma de U; B = Incisão linear em forma de V. Os números nos desenhos correspondem: 1= LM (Largura Maior); 2 = LN (Largura Menor); 3 = PLM (Profundidade Maior); 4 = PLN (Profundidade Menor).

O próximo passo foi a inserção das informações coletadas em campo no software Excel, para rápidos procedimentos estatísticos (variância, desvio padrão e coeficiente de variação) visando entendimento sobre a dispersão dos dados. Posteriormente estes foram organizados em 13 classes, determinando-se para cada classe: (i) média; (ii) frequência absoluta; (iii) probabilidade de ocorrência. Os intervalos utilizados são apresentados na Tabela 1.

Assim, escreveu-se uma rotina a partir do método de Monte Carlo, utilizando-se linguagem de programação FORTRAN (RUBINSTEIN e KROESE, 2007; LANDAU e BINDER, 2014), na qual foi simulada a ocorrência de todas as variáveis para toda a extensão das feições lineares existentes no local.

Tabela 1 – Intervalos em metros para LM, LN, PLM, PLN corresponde às 13 classes

Classes	Intervalos (m) para Largura Maior (LM)	Intervalo (m) para Largura Menor (LN)	Intervalo (m) para Profund. Maior (PLM)	Intervalo (m) para Profund. Menor (PLN)
1	0,01 – 1,00	0,01 – 0,73	0,01 – 0,54	0,01 – 0,36
2	1,01 – 2,00	0,74 – 1,46	0,55 – 1,08	0,37 – 0,72
3	2,01 – 3,00	1,47 – 2,19	1,09 – 1,62	0,73 – 1,08
4	3,01 – 4,00	2,20 – 2,92	1,63 – 2,16	1,09 – 1,44
5	4,01 – 5,00	2,93 – 3,65	2,17 – 2,70	1,45 – 1,80
6	5,01 – 6,00	3,66 – 4,38	2,71 – 3,24	1,81 – 2,16
7	6,01 – 7,00	4,39 – 5,11	3,25 – 3,78	2,17 – 2,52
8	7,01 – 8,00	5,12 – 5,84	3,79 – 4,32	2,53 – 2,88
9	8,01 – 9,00	5,85 – 6,57	4,33 – 4,86	2,89 – 3,24
10	9,01–10,00	6,58 – 7,30	4,87 – 5,40	3,25 – 3,60
11	10,01–11,00	7,31 – 8,03	5,41 – 5,94	3,61 – 3,96
12	11,01–12,00	8,04 – 8,76	5,95 – 6,48	3,97 – 4,32
13	12,01–13,00	8,76 – 9,50	6,49 – 7,02	4,33 – 4,70

O método de Monte Carlo foi utilizado no trabalho da seguinte forma: inicialmente ingressou-se com o comprimento total das feições erosivas lineares (somatório mensurado no QGIS na etapa anterior = 145.526 metros). Em seguida, foi inserida a distância entre os pontos de coleta de dados em campo (15 metros). Continuando, foi informado o valor médio de cada faixa de frequência para as variáveis LM, LN, PLM e PLN. Com estes dados, o programa realizou quatro sorteios aleatórios de um número entre 0 e 1. Este foi dividido em 13 faixas seguindo os percentuais de ocorrência (probabilidades) obtidos em campo. O primeiro sorteio determina LM, o segundo LN, o terceiro PLM e o quarto PLN. Os números obtidos simulam os valores médios de LM, LN, PLM e PLN. Um quinto número aleatório foi sorteado no intuito de determinar se aquele ponto simulado corresponde a uma incisão erosiva em forma de V ou de U, utilizando-se da frequência medida para esses dois tipos de formas. Após isso, realizou-se o sorteio dos quatro próximos números que gerou o valor das medidas para o próximo ponto, e assim sucessivamente, até completar o total de pontos simulados.

Assim, foi medido em campo (LM, LN, PLM e PLN) um total de 201 pontos, que organizados em classes com suas respectivas probabilidades, foram simuladas condições de largura e profundidade em 9.701 pontos.

Vale acrescentar que o método de Monte Carlo aumenta a aleatoriedade das medidas sem provocar fuga dos resultados da probabilidade. A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta que leva em consideração o caráter estocástico do problema (LAQUINI, 2009), isto é, considera determinadas condições de aleatoriedade existente no fenômeno físico. É o caso das larguras, profundidades e formas das feições erosivas encontradas na área estudada. Nicholls e

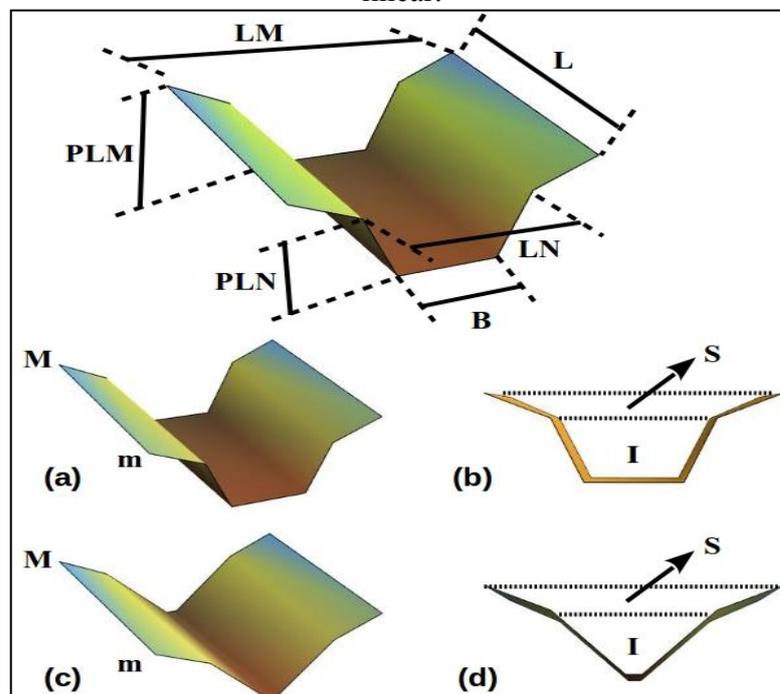
Stephenson (1995) em estudo utilizando o modelo de Monte Carlo reconhecem a natureza estocástica dos processos erosivos, sendo possível sua simulação por esse método.

Tendo obtido todos os valores de LM, LN, PLM e PLN, a próxima etapa foi estimar a perda de solo correspondente aos atuais ravinamentos e voçorocamentos, para isso, aproximou-se a geometria de dois pontos consecutivos de feições erosivas por dois sólidos trapezoidais superpostos (FIGURA 11), cujo volume é dado por:

$$Vol = \frac{L}{3} [(A_{MS} + A_{mS} + \sqrt{A_{MS}A_{mS}}) + (A_{MI} + A_{mI} + \sqrt{A_{MI}A_{mI}})]$$

Onde  $L$  é a distância entre dois pontos medidos,  $A_M$  e  $A_m$  são, respectivamente, as áreas dos trapézios nas extremidades  $M$  e  $m$  do sólido trapezoidal. Os subíndices  $s$  e  $i$  indicam os trapézios superiores e inferiores, onde considerou-se como superior o trapézio formado pelos lados LM, LN e (PLM-PLN). O trapézio inferior foi então o trapézio de lados LN, B e PLN, onde definiu-se  $B = \min(LN - 10\text{cm}; \text{ou } 15\text{cm})$  dependendo do tipo de forma da feição erosiva. Isto é, se a feição está em forma de “U”, tomou-se o lado LN-10 cm, por outro lado, se a feição está em forma de V, assume-se que o lado menor do trapézio é de 15 cm.

Figura 11 - Representação de trecho formado por dois pontos medidos de uma feição erosiva linear.



Obs.: Na parte superior está exemplo de um modelo com dois pontos medidos. Na parte inferior da figura: (a) e (b) as visões estão em perspectiva e frontal de uma incisão linear do tipo “U”; (c) e (d) as visões estão em perspectiva e frontal de uma incisão do tipo “V”. Os pontos M e m representam os dois pontos medidos onde tomou-se as áreas  $A_M$  e  $A_m$ . As letras S e I mostram uma visão frontal dos trapézios superior e inferior, respectivamente.

### **2.2.5. Confeção de MDE, perfil topográfico e mapa de superfícies expostas na vertente selecionada.**

Após definição da vertente onde os estudos sobre os solos se concentraram, foi realizado voo com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), tipo Multirotor (Drone Multirotor), que foi capaz de produzir ortofoto e Modelo Digital de Elevação (MDE) com alta resolução espacial, visando gerar diversas informações morfométricas da vertente selecionada, além da confecção de material cartográfico sobre a distribuição espacial dos materiais.

Os pontos de controle em campo foram gerados a partir de trabalho de levantamento topográfico em campo, utilizando receptores GPS (CHC X90) de dupla frequência (L1/L2) e método estático pós-processado, que garantiram precisão e qualidade para os dados originados a partir do trabalho com o VANT. Estes dados também foram importantes na construção de um perfil topográfico bastante fiel à forma da vertente.

O voo foi realizado em 4 de março de 2019, no 10º dia dentro de um pequeno período chuvoso no local, com acumulado de 60 mm, de acordo com Embrapa (2020), que estabeleceu significativa influência da cobertura vegetal na ortofoto. O tempo de voo foi de 30 minutos, com altura de 120 metros, produzindo 344 imagens com resolução de 3.84 cm/pix, cobrindo uma área de 0,63 km<sup>2</sup>. O mosaico das imagens, o processamento, a confecção do MDE e das curvas de nível (com equidistância de 1 metro) foram realizadas no software Global Mapper.

O trabalho com o VANT gerou importante apoio na verificação da distribuição dos materiais na vertente, visto que a alta exposição dos solos facilitou a compreensão da organização lateral dos materiais.

A partir da ortofoto foi realizada classificação supervisionada no ambiente do software ArcGis 10.3 (ArcMap / Image Classification / Maximum Likelihood Classification) pelo método da Máxima-Verossimilhança (MENESES e SANO, 2012) para confecção de mapa de superfícies na vertente. As classes corresponderam a: 1 - cobertura vegetal; 2 - *solum*; 3 - horizonte C e transição para *solum*; 4 - horizonte C e transição para calcretes pulverulentos; 5 - calcretes pulverulentos da base dos perfis. As classes 2 a 5, representam diferentes materiais expostos, que apresentam distintas colorações, apontando a agressividade e/ou profundidade do processo erosivo.

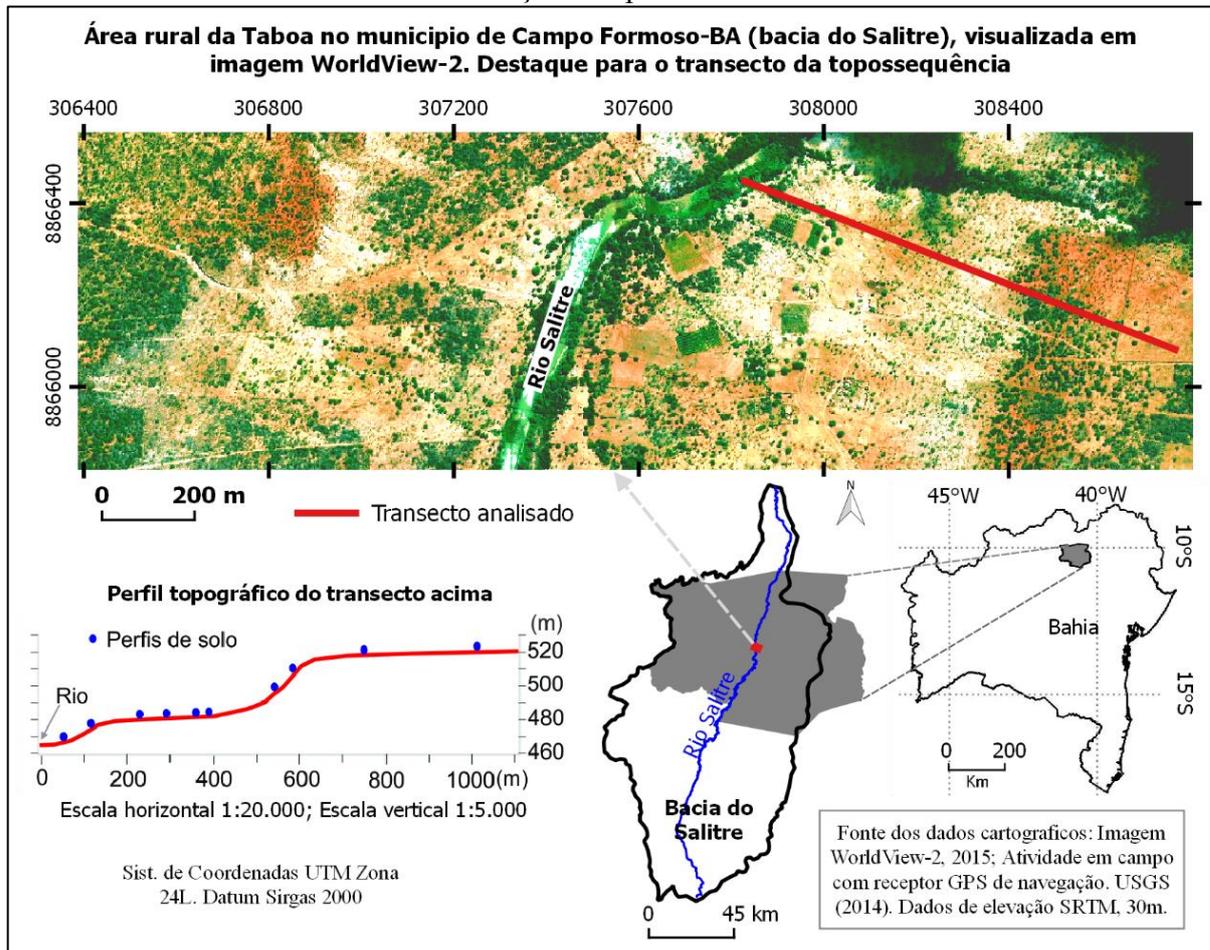
### **2.2.6. A topossequência, descrição morfológica e coleta de amostra em campo**

As etapas descritas anteriormente serviram de base na escolha do transecto para a coleta de amostras e estudo de perfis de solo em topossequência (BOULET et al., 1982; QUEIROZ NETO, 2002; QUEIROZ NETO, 2011).

Optou-se por desenvolver esta etapa do estudo em uma vertente nas proximidades da comunidade de Taboa, localizada a 70 km (noroeste) da sede do município de Campo Formoso-BA. Pelas imagens de satélite e visitas prévias em campo foi possível observar a representatividade da vertente escolhida. Vale acrescentar também o fácil acesso à propriedade rural, que também é uma das condições importantes para abertura de perfis e retirada de amostras.

Utilizando receptor GPS de navegação percorreu-se uma distância de aproximadamente 2,5km transversal ao rio Salitre, com intuito de fazer os primeiros levantamentos sobre a morfometria das vertentes. Foi verificado que existe considerável variação topográfica entre o leito do rio (475m de altitude) e o platô W-E (em torno de 530m), de acordo com a Figura 12. A figura também destaca o transecto no qual foi estudada a variação dos horizontes que compõem a cobertura pedológica ao longo de uma vertente.

Figura 12 - Recorte de imagem do satélite WorldView-2 nos arredores da comunidade rural de Taboa, destacando o transecto da topossequência, perfil topográfico representativo e distribuição dos perfis de solo.



Visando planejamento dos locais de abertura dos perfis, foi inicialmente verificada as características de cor e textura do material, usando trado e principalmente a observação direta nas paredes ou taludes das incisões erosivas (ravinas/voçorocas) para identificação das variações dos materiais em profundidade e ao longo da vertente, e identificação dos horizontes. Seguindo procedimento descrito por Boulet et al. (1982) a definição da quantidade de trincheiras que serão abertas para estudos dos perfis de solo, dependerá de sondagens prévias. Neste procedimento foi importante a utilização de um pedocomparador, isto é uma maleta de madeira contendo caixinhas transparentes de acrílico (medindo 4,5 x 4,5 x 4,5 cm), nas quais foram armazenadas pequenas amostras de materiais referentes às variações verticais e laterais (ao longo da vertente). Esse procedimento permitiu encontrar pontos de transição lateral dos horizontes pedogenéticos e/ou materiais. Essas transições laterais foram apontadas como os locais para estudo do perfil do solo (descrição morfológica) e coleta de amostras, pois concentram as informações de como o sistema de transformação atuou.

Em vista dessa primeira observação decidiu-se estudar 10 perfis, sendo três com necessidade de abertura de trincheira (perfis P1 e P2, no platô e perfil P5 na meia encosta) e os outros utilizando as paredes das feições erosivas (FIGURA 13). Também foram coletadas amostras superficiais em dois pontos dentro do leito do rio Salitre, o primeiro no leito maior com material arenoso, e o segundo no talvegue, com material silto-argiloso.

Figura 13 - Paredes de feição erosiva linear com 2,60m de profundidade. Atividade de observação das variações dos horizontes da cobertura pedológica na perspectiva vertical e ao longo da vertente.



Em cada perfil foi feita descrição morfológica de acordo com Santos et al. (2013), com preenchimento da “Ficha de Descrição de Solos” para registro de informações gerais da área, além de anotações quanto às características dos materiais (cor, textura, estrutura, consistência e outros), visualizadas e interpretadas em cada um dos horizontes. Optou-se por organizar os registros e a coleta de amostras por horizontes, de acordo com as condições genéticas dos materiais.

Foram coletadas amostras deformadas (armazenadas em sacos plásticos) para análises físicas e químicas e amostras indeformadas, em forma de monólitos, para análise micromorfológica de acordo com Stoops (2021) e Castro e Cooper (2019). Os monólitos foram coletados diretamente das paredes dos perfis através da esculturação (utilizando faca), com o cuidado para preservar a estrutura *in natura* do material, os quais foram envolvidos com filme de PVC e plástico bolha, e armazenados em caixas de papel cartão com dimensões em torno de 10x10 x5cm.

### 2.2.7. Análises físicas e químicas.

As amostras deformadas foram utilizadas para um conjunto de análises físicas e químicas. Estas amostras foram inicialmente secas ao ar e posteriormente passaram por destorroamento e peneiramento para separação das frações calhaus e cascalhos (>2,0 mm) da terra fina (<2,0 mm). As amostras com terra fina seca ao ar (TFSA) foram encaminhadas para os laboratórios.

As análises físicas contemplaram a granulometria (fracionada em areia grossa, areia fina, silte e argila) e a argila dispersa em água (ADA) utilizando o método da pipeta, procedimentos conduzidos de acordo com Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (DONAGEMMA et al., 2011), realizado no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências (IGC) da UFMG.

Como parte importante na análise granulométrica, pré-testes foram realizados nas amostras (ALMEIDA et al., 2012), como o pH (verificou-se que se tratava de amostras muito alcalinas) e a condutividade elétrica (amostras dentro de condições aceitáveis para o método – entre 0,0 e 4,0 dS m<sup>-1</sup>). Também foi realizado procedimento para medição da umidade residual da amostra do solo, para cálculo da correção de umidade (Fator “f”), além da densidade de partícula, utilizado para calcular o tempo de sedimentação da fração silte.

Como os solos estudados são carbonáticos (amostras com alto pH) foi utilizado para análise granulométrica o hexametáfosfato de sódio, um dispersante específico para estes casos, de acordo com Donagemma et al. (2011). Com base nos dados da granulometria e da ADA foram extraídas informações sobre a textura, relação silte/argila e grau de flocculação (GF).

Das análises químicas, três foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia do IGC/UFMG: pH, carbono orgânico (C org) e equivalente de carbonato de cálcio, seguindo procedimentos de acordo com Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (TEIXEIRA et al., 2017). No primeiro mediu-se pH em H<sub>2</sub>O e em solução de KCl (1N), utilizando potenciômetro com eletrodo combinado de vidro. O segundo seguiu o método via úmida, na qual a determinação do C org. ocorre pela oxidação com dicromato de potássio e titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal. O C org. foi fundamental na fórmula/cálculo para obtenção do teor de Matéria Orgânica do solo. O equivalente de CaCO<sub>3</sub> foi extraído a partir de ataque à amostra com excesso de solução padrão de HCl e titulação do excesso de ácido com solução de NaOH padrão (TEIXEIRA et al., 2017), também conhecido como método de padronização de ácidos (ALLISON e MOODIE, 1965).

Outras análises químicas, como quantificação dos teores de  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$   $\text{Na}^+$  e  $\text{H}^+$  (complexo sortivo), foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos (LASO) do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA).  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  foram extraídos com solução de  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , já o  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  a partir de extração com solução Mehlich<sup>-1</sup>, de acordo com Teixeira et al., 2017. Os dados serviram de base para indicar a Soma de Bases (Valor S), a CTC (Valor T) e a percentagem da Saturação por Bases (V%).

### **2.2.8. Análises micromorfológica**

Foram coletadas em campo 17 amostras indeformadas em horizontes de diferentes perfis de solo na topossequência. Procedeu-se com a esculturação de monólitos na parede do perfil do solo, que foram diretamente armazenados em pequenas caixas de papel cartão, de acordo com Castro e Cooper (2019). Em laboratório, as amostras foram impregnadas com resina plástica não expansível de poliéster, diluída com solvente e adicionada de um catalisador. Após secagem da resina (amostra endurecida) foi realizado o corte e a confecção das lâminas delgadas (CASTRO e COOPER, 2019).

Essas lâminas foram analisadas em microscópio óptico petrográfico trinocular da marca Zeiss, modelo Axioskop 40, com câmera digital AxioCam 208, utilizando objetivas de: 2,5x; 5,0x; 10x; e 50x. As terminologias utilizadas na descrição e interpretação das lâminas seguiram o manual proposto por Stoops (2021).

### **2.3. Integração e análise dos dados**

Corresponde à análise e interpretação dos dados produzidos nas etapas anteriormente apresentadas. Informações sobre os materiais foram cruciais na “caracterização e distribuição da cobertura pedológica” que foram correlacionados com as informações sobre “os processos e a evolução morfodinâmica das vertentes”.

I – A caracterização e distribuição da cobertura pedológica foram guiadas sequencialmente a partir da:

- a) Classificação dos solos – realizada a partir da integração entre os dados das análises físicas e químicas e da descrição morfológica dos perfis. A classificação ocorreu até o quarto nível categórico, utilizando “Chave para Identificação das Classes de Solos” de acordo com o atual Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS et al., 2018).

- b) Definições e aspectos interpretados na micromorfologia deram suporte na definição, caracterização e gênese dos materiais constituintes.
- c) Correlação entre descrição morfológica em campo, análises físicas, químicas, mineralógicas e micromorfológicas, além da análise da paisagem (morfologia e morfometria) para definição sobre os materiais e sua gênese no local.
- d) Utilização de informações/dados sobre os materiais em estudos já desenvolvidos no local e apontados na caracterização da área, e correlação com os dados produzidos na pesquisa.
- e) Utilização do MDE e das imagens do VANT para: confecção de mapas da distribuição da cobertura pedológica na vertente e cobertura vegetal; e confecção de perfis topográficos com a variação bidimensional dos materiais na vertente. Os mapas foram confeccionados nos softwares ArcGIS e QGIS, e o perfil bidimensional no software CorelDRAW.

II - Os processos e a evolução morfodinâmica das vertentes foram guiadas sequencialmente a partir da (o):

- a) Utilização de informações/dados sobre a evolução e morfogênese nos trabalhos já desenvolvidos no local e apontados na caracterização da área.
- b) Associação entre as condições climáticas do semiárido local, devidamente caracterizadas nesse trabalho, e os tópicos seguintes (c, d, e).
- c) Interpretação de lâminas na análise micromorfologia associadas a interpretações da paisagem (formas do relevo, presença de feições erosivas etc.).
- d) Análise dos resultados da espacialização das feições erosivas lineares e a estimativa de perda de solo na vertente, capazes de dimensionar parte da morfodinâmica atual.
- e) Verificação de tipologias e alterações na paisagem nas últimas décadas, a partir da interpretação de fotografias aéreas em associação com imagens de satélite atuais e visitas em campo.
- f) Indicação de importantes processos pedogeomorfológicos responsáveis pela evolução da paisagem local.

A associação entre as condições da cobertura pedológica e a morfodinâmica da vertente constitui uma abordagem pedogeomorfológica, reforçada nesse trabalho por uma perspectiva investigativa multiescalar, que foi capaz de produzir dados e apresentar resultados que indicaram eventos passados, dentro do Quaternário, assim como dinâmicas atuais, além de consistentemente expor uma perspectiva evolutiva da paisagem futura.

**S E Ç Ã O II - MATERIAIS CARBONÁTICOS E OS SOLOS NO  
MEDIO CURSO DA BACIA DO RIO SALITRE, BAHIA.**

### **3. SOLOS CARBONÁTICOS E A FORMAÇÃO DE HORIZONTES CÁLCICOS E CALCRETES EM CLIMA SEMIÁRIDO**

#### **3.1. Rochas carbonáticas**

Rochas carbonáticas são constituídas por mais de 50% de minerais carbonáticos, sendo calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) os mais importantes (TUCKER e WRIGHT, 1990). “Os carbonatos resultam da combinação do  $\text{CO}_3^{2-}$  com metais e metalóides, ou da reação do ácido carbônico com esses elementos” (ZANARDO e MARQUES JR, 2009, p. 119). Além de calcita, dolomita e aragonita, as rochas carbonáticas podem possuir minerais como anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ankerita ( $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), e outros não-carbonáticos como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), argilominerais, entre outros (AKBAR et al., 2001; SUGUIO, 2003).

Uma das rochas carbonáticas mais comuns é o calcário (formada predominantemente por calcita), gerada pela acumulação e litificação de minerais carbonáticos precipitados por processos químicos e bioquímicos, principalmente em ambiente marinho. Outras, como o dolomito (formado predominantemente por dolomita), são geradas a partir de alterações diagênicas nos calcários ou sedimentos carbonáticos, associadas a substituições de íons de cálcio da calcita/aragonita por íons de magnésio, convertendo o mineral carbonato de cálcio em carbonato de cálcio e magnésio (TUCKER e WRIGHT, 1990; PRESS et al., 2006; MELO et al., 2009). Os dolomitos e principalmente os calcários predominam entre as litologias carbonáticas.

Os calcários, apesar de serem mineralogicamente simples, baseado fundamentalmente no carbonato de cálcio (TUCKER e WRIGHT, 1990; AKBAR et al., 2001), possuem grande variedade de outros componentes minerais, carbonáticos e não carbonáticos (WILLIAMS et al., 1970), que aumentam a complexidade da rocha. Mesmo os calcários ou dolomitos considerados puros (menos de 10% de minerais não carbonáticos) podem conter outros minerais para além da calcita ou dolomita respectivamente, o que de fato amplia possibilidades para os produtos da alteração dessas rochas.

#### **3.2. Solos associados a materiais carbonáticos**

Na formação de solos provenientes de calcários, dolomitos e materiais superficiais ricos em calcita e/ou dolomita, outros minerais apontados como impurezas (por possuir menor contribuição na composição da rocha) exercem significativa importância na constituição final

dos solos. Sobre esse assunto, Auler, Piló e Saadi (2005), Fontes (2012), Kampf e Curi (2012) afirmam que na maioria das áreas carbonáticas conhecidas, as características do solo estão geralmente relacionadas com as impurezas no calcário, pois os carbonatos serão, em princípio, completamente solubilizados e lixiviados pelas águas percolantes. Resende et al. (2011) reiteram que são as impurezas do calcário que dão origem ao solo, considerando que na formação de um solo desenvolvido sobre esse tipo de rocha (em um contexto mais úmido), praticamente todo o carbonato de cálcio ou magnésio é removido. Os autores analisaram amostras de horizonte C de calcários do Grupo Bambuí no sudeste de Minas Gerais e assinalaram a presença de caulinita, goethita, hematita, mica e quartzo, sendo que os dois últimos não foram apontados como pedogenéticos<sup>2</sup>. Piló (2000), Auler, Piló e Saadi (2005) destacam que os resíduos insolúveis dos calcários são principalmente compostos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Em condições de maior umidade pode, de fato, ocorrer remoção total dos carbonatos das rochas calcárias, mas em climas áridos os carbonatos primários podem permanecer no solo (DONER e LYNN, 1989), constituindo bases distintas para diferentes mineralogias.

Os minerais carbonáticos estão entre os mais instáveis frente aos processos químicos intempéricos gerados pela ação da água ácida, que percola solos e rochas. A calcita (CaCO<sub>3</sub>) pode ser dissolvida completamente pela água, como pode ser visto na reação (dissolução):



A reação é acelerada pela presença de CO<sub>2</sub> dissolvido na água da chuva e produzido pela ação biogênica no solo, que a partir da calcita libera Ca<sup>2+</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>1-</sup> (bicarbonato) para solução, que em climas mais úmidos são totalmente lixiviados. Isso quer dizer que em condições de maior umidade, as águas percolantes, por possuírem menores valores de pH, dispõem maior capacidade de reação intempérica e lixiviação dos elementos presentes nos carbonatos (FONTES, 2012).

Mello e Perez (2009) afirmam que calcita e dolomita se dissolvem a pH baixo, dessa forma os carbonatos são suficientemente solúveis em solos ácidos. Os mesmos autores em abordagem sobre evolução de solos em rochas carbonáticas afirmam que “à medida que os metais alcalinos (bases trocáveis) são lixiviados dos solos, o pH diminui, possibilitando a entrada de H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> no complexo de troca em substituição ao Ca<sup>2+</sup> e outras bases” (MELLO e PEREZ, 2009, p. 186). Assim, as rochas carbonáticas, mesmo possuindo uma tendência para

---

<sup>2</sup> Particularmente na estratigrafia do Grupo Bambuí, as rochas calcárias são geralmente recobertas por rochas pelíticas (Filitos e Silitos). Nesse caso os solos não apresentam uma filiação genética direta com a rocha calcária existente na base do perfil, mas provem das rochas pelíticas sobrepostas. Portanto a participação do produto residual da rocha calcária dissolvida na formação dos solos é pequena (AULER; PILÓ e SAADI, 2005, p. 329).

gerar solos alcalinos e mineralogia carbonática, podem ao longo do processo pedogenético, formar solos ácidos e com mineralogia associadas às impurezas presente na rocha ou em materiais de outras estratigrafias associadas ao contexto geológico-geomorfológico do local.

Apesar dos carbonatos exercerem influência mais restrita na constituição do manto intemperizado, solos gerados sobre calcários em condições tropicais tendem, por exemplo, a apresentar bases, como Ca e Mg, mais elevadas do que solos formados sobre outras litologias, como visto por Mesquita (2015) em solos gerados sobre rochas carbonáticas no sudeste brasileiro.

A profundidade do solo é outro aspecto que está ligado às impurezas da rocha calcária, pois quanto maior a contribuição das impurezas na rocha, mais espesso será o solo, e por outro lado, quanto mais puro o calcário, menos espesso o solo. Às vezes, solos bastante espessos sobre rochas calcárias estão associados, geneticamente, a uma outra litologia anteriormente existente, como intercalações de rochas pelíticas, por exemplo (PILÓ, 1998; HARDT, 2004).

### **3.3. Condições semiáridas e a acumulação de carbonato de cálcio secundário: formação de horizontes cálcico e petrocálcico**

Para análise da formação de um solo, de forma geral, deve-se considerar às condições climáticas, principalmente de temperatura e pluviosidade. Para solos provenientes de rochas carbonáticas o volume pluviométrico é fator decisivo. Em climas com déficit de umidade, a pedogênese será bastante distinta, produzindo solos com características físicas, químicas e morfológicas significativamente diferentes em comparação com áreas com excedente hídrico. Bigarella (1996), Oliveira (2008), Lynch (2009) apontam que no contexto brasileiro, em áreas com clima semiárido (com baixo índice de chuva e elevada evapotranspiração), há tendência de precipitação de carbonatos nos solos desenvolvidos sobre rochas calcárias.

Kampf e Curi (2012) explicam que a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  acontece quando há incremento na concentração de bicarbonato de cálcio na solução do solo devido à evaporação da água ou quando a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  é reduzida<sup>3</sup>. A precipitação de carbonatos só pode ser viável diante de um contexto ambiental com déficit hídrico, onde o volume de água é insuficiente para a dissolução e posterior lixiviação completa dos carbonatos (o semiárido brasileiro, por exemplo). Os mesmos autores enfatizam que a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  está

---

<sup>3</sup> A pressão parcial do  $\text{CO}_2$  do ar do solo pode ser reduzida com a diminuição da matéria orgânica e atividade de microrganismos. A pressão do  $\text{CO}_2$ , especialmente no Horizonte A, rico em matéria orgânica, é muito alta, chega a ser cem vezes maior do que o ar atmosférico, capaz de promover a dissolução da calcita (OLIVEIRA, 2008).

associada à distribuição do CO<sub>2</sub> no solo, que depende do equilíbrio entre a produção deste no interior dos solos por microrganismos e raízes das plantas, e as perdas por difusão para a atmosfera. Em climas mais secos há menor produção de matéria orgânica, e por consequência haverá menor pressão parcial do CO<sub>2</sub> no solo. Esse fator contribui para o aumento do pH (redução da acidez) e por consequência promove a precipitação de carbonatos. A precipitação da calcita, por exemplo, pode ser expressa pela reação:



Mello e Perez (2009) afirmam que a concentração de Ca e Mg solúveis reduzem com o aumento do pH, o que equivale dizer que a calcita e dolomita tornam-se mais estáveis em meio alcalino, precipitam-se em valores de pH superiores a 7,5. Brady e Well (2013) afirmam que o pH no qual o CaCO<sub>3</sub> se precipita no solo, está em geral entre 7,0 e 8,0, dependendo da concentração de CO<sub>2</sub> que tiver sido acrescentada pela atividade biológica. Portanto, o pH elevado, o déficit hídrico e a menor pressão de CO<sub>2</sub> são condições essenciais para a calcificação em climas áridos e semiáridos.

Este processo químico de precipitação nos solos carbonáticos causa uma evidente acumulação de carbonato de cálcio secundário no perfil (SCHAETZL e ANDERSON, 2005). O carbonato pode se apresentar como um precipitado fino ( $\leq 1\text{mm}$ ) e difuso, impregnado na matriz do solo, e/ou apresenta-se como concentrações descontínuas, como pseudomicélios, revestimentos e nódulos macios ou endurecidos, geralmente com coloração branca (OLIVEIRA, 2008). Khresat (2001), em estudo realizado no Oriente Médio em clima mediterrâneo, encontrou acumulações de CaCO<sub>3</sub> pedogênicos caracterizados por ligeiros filamentos de carbonato, com presença de nódulos e concreções, além de horizontes com os poros completamente preenchidos.

No Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS et al., 2018), a acumulação de carbonato de cálcio secundário no perfil do solo, em condições que venha a formar um horizonte com, no mínimo, 15 cm de espessura, recebe a designação de horizonte cálcico (normalmente ocorre no Horizonte C, mas pode ocorrer no B ou A). Khresat (2001) enfatiza que o horizonte cálcico é um horizonte iluvial no qual os carbonatos secundários, geralmente cálcio ou magnésio, se acumularam de forma significativa. O referido horizonte deverá conter 150g/kg ou mais de CaCO<sub>3</sub> equivalente, tendo no mínimo 50g/kg a mais de carbonato que o horizonte sotoposto, mas se o horizonte cálcico está sobre materiais altamente calcínicos (40% ou mais de CaCO<sub>3</sub>) a percentagem de carbonato não precisa reduzir em profundidade (SANTOS

et al., 2018). Para designação de um horizonte com acumulação de carbonato de cálcio secundário utiliza-se  $\bar{k}^4$  como sufixo para os horizontes C, B ou A (SANTOS et al., 2013).

O termo carbonático, dentro da classificação dos solos, não expressa apenas a existência de horizontes cálcios, mas também incorpora os solos com caráter carbonático, isto é, a presença de 150g/kg ou mais de  $\text{CaCO}_3$  equivalente sob qualquer forma de segregação, inclusive concreções, mas que não esteja satisfazendo as exigências e requisitos para ser classificado como um horizonte cálcico (OLIVEIRA, 2008; SANTOS et al., 2018).

Regiões com precipitações inferiores a 500/600 mm/ano e balanço hídrico negativo favorecem processos pedogenéticos que levam a acumulação de  $\text{CaCO}_3$  nos perfis de solo (ALONSO-ZARZA, 2003), uma vez que os carbonatos tendem a serem removidos do perfil. Bayat et al. (2018), em estudos sobre solos cálcicos no Irã, apontam que áreas com índices pluviométricos anuais superiores a 500 mm possuem condições para formação de argilominerais, e inferiores a 500mm, possuem condicionantes favoráveis para a acumulação de carbonato de cálcio. Yaalon (1997), estudando solos carbonáticos em clima mediterrâneo, afirma que em um ambiente com precipitação acima de 600mm pode ocorrer a dissolução e possível lixiviação do  $\text{CaCO}_3$ .

A partir do avanço e continuidade da precipitação de  $\text{CaCO}_2$  (calcificação) no horizonte cálcico, poderá ocorrer a cimentação e consolidação do material, formando um horizonte contínuo, endurecido e maciço, denominado de horizonte petrocálcico (BACHMAN e MACHETTE, 1977; YAALON, 1997; BROCK e BUCK, 2009; LYNCH, 2009; SANTOS et al., 2018). Neste horizonte a consistência do material quando seco está entre muito duro e extremamente duro, e quando úmido está entre muito firme e extremamente firme, que, na prática, não permite a penetração de raízes. A espessura para horizontes petrocálcicos geralmente deverá ser superior a 10cm (OLIVEIRA, 2008; SANTOS et al., 2018).

Outros termos bastante utilizados para horizontes petrocálcicos incluem caliche e calcrete (YAALON, 1997; DIXON, 1994; SCHAEZTL e ANDERSON, 2005; DAL' BÓ et al., 2009; BAYAT et al., 2018), também os termos calcrosta (BIGARELLA, 1996) e encroûtements (RUELLAN et al., 1977).

Na formação do horizonte cálcico/petrocálcico, Gile et al. (1966) apontam a importância de distintos movimentos da água no interior do solo, como a ascensão capilar, os movimentos

---

<sup>4</sup> Em descrições anteriores à publicação de Santos et al. (2013) utilizava-se o símbolo  $\bar{K}$ . A utilização da letra k como sufixo acompanhado A, B e C (horizontes) registra a presença de carbonatos remanescentes do material original, diferente de  $\bar{k}$ , que se refere a acumulação de carbonato de cálcio secundário (SANTOS et al., 2013).

laterais, e a translocação do carbonato de cálcio da superfície e sua acumulação em alguma profundidade com conseqüente precipitação. Schaetzl e Anderson (2005) enfatizam esse último movimento, apontando que a maior atividade orgânica no horizonte superior do solo produz soluções mais ácidas que solubilizam o  $\text{CaCO}_3$ , durante os períodos mais chuvosos, translocando íons de cálcio e bicarbonato para maiores profundidades, onde há condições mais secas, menor teor de  $\text{CO}_2$  e pH mais alto, para a precipitação e acumulação do  $\text{CaCO}_3$  secundário. Os autores mencionam que, em subsuperfície, essa acumulação ocorre quando a frente de molhamento se estaciona, devido à falta de energia e quantidade de água, isto é, não há mais água para empurrá-la para baixo ou não há forças suficientes para puxá-la para baixo. A absorção e interceptação pelas raízes das plantas também pode forçar a frente de molhamento a parar.

Bachman e Machette (1977) reconhecem a importância do movimento da água por fluxo capilar ascendente, induzida por evaporação constante na superfície para acumulação de carbonatos pedogênicos. No entanto, o processo principal é a lixiviação de carbonatos dos horizontes superiores do solo pela água em movimento descendente.

A profundidade da calcificação e formação do horizonte cálcico em muitos solos está associada ao índice anual de chuvas, assim maiores precipitações pluviais pressionariam a umidade a penetrar mais fundo no perfil (RETALLACK, 1998), reconhecendo que quanto mais seco for o clima, mais próximo da superfície ocorrerá o acúmulo dos carbonatos (OLIVEIRA, 2008). Essa acumulação ocorrerá na profundidade máxima que a umidade frequentemente chega (MILNES, 1992). Outras condições devem ser também consideradas, como: inclinação, posição na paisagem, permeabilidade, presença ou ausência de uma crosta superficial, cobertura vegetal, e a distribuição temporal e intensidade da precipitação, que são fatores que interferem na infiltração e/ou permeabilidade da água no perfil do solo, conseqüentemente, interferindo na profundidade do processo de calcificação de carbonatos secundários (SCHAETZL e ANDERSON, 2005).

A intensidade da chuva e a concentração temporal de grandes eventos chuvosos também possuem grande importância na profundidade da calcificação (AMUNDSON et al., 1997; YAALON, 1997). Schaetzl e Anderson (2005) mencionam que durante chuvas intensas há quase sempre alguma lixiviação, dificultando a formação de horizonte cálcico muito próximo à superfície. Um grande volume de chuvas em curto espaço de tempo constitui um mecanismo que aumenta a profundidade do processo de calcificação.

Bachman e Machette (1977) apontam a taxa de evaporação e a temperatura média anual como importantes fatores na calcificação. Após eventos chuvosos, em climas semiáridos,

soluções contendo carbonato infiltram no solo, e como a evaporação excede às chuvas, há a instalação de condições propícias para precipitação de carbonatos. Os autores comentam que os climas desérticos extremos, apesar da alta taxa de evaporação, não são propícios para a acumulação de carbonatos, porque deve haver chuvas suficientes para que soluções de solo ricas em carbonato se desloquem nos horizontes do solo. No outro extremo, em climas úmidos, a alta infiltração de água provoca lixiviação dos carbonatos do perfil.

#### **3.4. Caracterização e importância dos solos carbonáticos em regiões com déficit hídrico.**

Os solos carbonáticos desenvolvidos em regiões com déficit hídrico (climas áridos e semiáridos) possuem peculiaridades genéticas, químicas, mineralógicas, físicas e morfológicas que facilmente os diferenciam em relação a outros solos formados em contextos diferentes, sejam eles climáticos ou geológicos.

Inicialmente, os solos com acumulação de carbonatos secundários nestes contextos climáticos destacam-se, de acordo com Khresat (2001), pela alta reatividade, que influenciam em algumas propriedades químicas, como o poder tampão, a capacidade de troca de cátions e a disponibilidade de nutrientes no solo. Em relação ao tamponamento, que constitui a resistência de um determinado solo às mudanças de pH, Brady e Well (2013) afirmam que o processo de dissolução e precipitação dos carbonatos contribui para garantir certa estabilidade no pH do solo (elevado poder tampão com manutenção dos mesmos níveis de alcalinidade), reduzindo flutuações que poderiam ser prejudiciais à vegetação, aos microrganismos do solo, e aos corpos hídricos, por exemplo.

Os solos carbonáticos geralmente são eutróficos, possuem elevado potencial nutricional, com altos teores de bases trocáveis, além de saturação por bases próxima a 100% e argila de alta atividade, com destaque para os elevados teores de carbonato de cálcio e/ou magnésio, e pH com valores superiores a 7 (CUNHA e RIBEIRO, 1998; SHINZATO, 1998; OLIVEIRA, 2008). Horizontes de solos calcários têm pH variando de 7,0 a 8,4 (BRADY e WELL, 2013). O pH elevado e o excesso de cálcio são características marcantes nesses solos e isso interfere amplamente na solubilização e absorção de íons, potencializando o aparecimento de deficiências na disponibilidade do enxofre e fósforo, e de alguns micronutrientes como o zinco, o ferro, o cobre, o manganês e o boro, visto que estes elementos possuem solubilidade inversamente proporcionais ao pH (MOREIRA et al., 2000; OLIVEIRA, 2008).

Do ponto de vista mineralógico e considerando a fração argila, os solos com horizontes cálcicos e petrocálcicos possuem quantidade significativa de argilominerais 2:1. Bachman e

Machette (1977) assinalam a montmorilonita e a illita como dois dos argilominerais mais comuns em solos carbonáticos sob climas semiáridos. Khormali e Abtahi (2003) em estudo sobre a origem e distribuição de argilominerais em solos calcários de regiões áridas e semiáridas no Irã, destacam a presença de paligorskita<sup>5</sup>, como argilomineral indicador de clima árido e esmectitas em condições mais favoráveis de umidade, associadas à clima semiárido. Os autores também destacam a diminuição geral do conteúdo de illita com a profundidade do solo, estando relacionada principalmente com a sua transformação em esmectita, sob circunstâncias mais úmidas dos horizontes mais profundos.

Shankar e Achyuthan (2007), estudando a gênese de horizontes cálcicos e petrocálcicos em uma região semiárida no sul da Índia, registraram a ocorrência de montmorilonita, esmectita, illita, e em menor quantidade, vermiculita, e até mesmo caulinita. Essa mineralogia encontrada indica o baixo grau de intemperismo dos solos, e que não houve mudanças significativas no regime climático antes e após a formação do horizonte cálcico, visto que a ausência de paligorskita confirma a inexistência de um clima árido. Nota-se a contribuição da mineralogia de argila na reconstituição de paleoambientes.

No semiárido brasileiro, no estado do Ceará, Oliveira et al. (2018), ao estudarem os solos formados sobre calcários da Formação Jandaíra, identificaram nas superfícies convexas e planas, vermiculita, illita, esmectita e caulinita, enquanto na superfície côncava, somente illita e caulinita foram encontradas. No contexto tropical brasileiro é comum a presença de caulinita (argila 1:1) nos solos carbonáticos (MESQUITA, 2015), mesmo no espaço regional dominado pelo clima semiárido.

Solos sobre calcários da Formação Jandaíra também foram estudados por Lemos et al. (1997) no semiárido do Rio Grande do Norte. Os autores apontaram maior presença de caulinita em Cambissolos eutróficos em porções mais elevadas do relevo, e conteúdo significativo de esmectitas em Cambissolos vérticos, localizados em porções rebaixadas, próximas ao fundo do vale. Cunha e Ribeiro (1998) estudaram perfis de Cambissolos Eutróficos desenvolvidos sobre calcários calcíticos na região de Irecê no semiárido baiano, encontrando na mineralogia da fração argila a predominância de caulinita e esmectita (montmorilonita).

A presença de caulinita em solo pouco intemperizado, como nos Cambissolos Eutróficos sobre litologia calcária do semiárido brasileiro é, até certo ponto, surpreendente, pois a caulinita comumente se associa a solos de climas mais úmidos. Contudo, essa presença pode ser

---

<sup>5</sup> Paligorskita - Presentes em solos de climas mais secos, com precipitação anual média entre 50-100 mm. Esse argilomineral pode ser utilizado como indicador paleoclimático de clima árido (EMADI et al., 2008; KHORMALI e ABTAHI, 2003; SHANKAR e ACHYUTHAN, 2007);

explicada pelo aspecto paleoclimático, admitindo influência de climas úmidos durante a história de formação desses solos. Pode também ser explicado pela presença de muscovita no resíduo do material de origem calcária, além da maior solubilização da sílica em condições alcalinas, combinada ao equilíbrio entre as atividades do  $K^+$  e do  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ , promovendo a rápida formação da caulinita. Isso significa que a mica, nesse contexto, não formaria argilominerais 2:1 (vermiculita ou esmectita), mas sim argila 1:1, como a caulinita (MOTA et al., 2007; SILVA, 2013). Há também o entendimento que em alguns locais com drenagem acentuada ocorre aumento na taxa de lixiviação e dessilificação, onde esmectitas e ilitas podem se transformar em caulinita (SILVA, 1977; MESQUITA, 2015).

Do ponto de vista físico e morfológico, os solos carbonáticos também expressam características associadas a processos pedogenéticos específicos. Por exemplo, a presença do cálcio eleva o grau de floculação, que interfere em diversas propriedades físicas, entre estas, a maior permeabilidade, favorecida pela melhoria da drenagem interna do perfil (OLIVEIRA, 2008; SILVA, 2013). Cambissolos desenvolvidos sobre rochas calcárias na região de Irecê no semiárido baiano foram avaliados em diversos estudos, entre eles Araújo e Ribeiro (1994); Cunha et al. (2000); e Paiva (2010), que apontaram, em condições de relevo plano, elevadas taxas de infiltração favorecidas pela elevada porosidade total dos solos.

Mas, em área onde o ambiente (notadamente com déficit hídrico) favorece a intensa calcificação nos solos e a formação de horizontes cálcicos e/ou petrocálcicos, as propriedades físicas e morfologia dos solos podem ser bastante diferentes. À medida que o material do horizonte se torna progressivamente mais endurecido, eles podem produzir uma camada impermeável à drenagem, com implicações na infiltração da água da chuva, promovendo a redução da infiltração e intensificação da erosão nas encostas (BACHMAN e MACHETTE, 1977; KHRESAT, 2001; WRIGRT, 2007). O desenvolvimento dos horizontes petrocálcicos, e muitas vezes dos horizontes cálcicos, restringem o crescimento de sistemas radiculares de plantas, constituindo de fato uma barreira à penetração de raízes (KHRESAT, 2001; WRIGRT, 2007; OLIVEIRA, 2008; KAMPF e CURI, 2012).

Estudo desenvolvido por Ferreira et al. (2016) em ambiente cárstico na Chapada do Apodi no semiárido brasileiro – entre o Ceará e o Rio Grande do Norte, apontou a existência de um horizonte com acumulação de carbonato de cálcio e forte cimentação, constituindo material com consistência extremamente dura e extremamente firme, afetando a drenagem interna do perfil, gerando baixa permeabilidade no solo. Em solos estudados nos Estados Unidos (Novo México e Nevada), Robins et al. (2015) também apontam a redução abrupta da infiltração nos horizontes petrocálcicos.

Solos carbonáticos com horizontes cálcicos e/ou petrocálcicos são também importantes indicadores paleoclimáticos e paleoambientais (SHANKAR e ACHYUTHAN, 2007; DAL' BÓ et al., 2009; DAL' BÓ e BASILICI, 2010; ROBINS et al., 2015; BAYAT et al., 2018) pois a existência desses horizontes registra, de fato, uma condição ambiental árida ou semiárida. Bachman e Machette (1977) apontam que a relação entre a distribuição dos calcretes e o clima atual nem sempre é coerente, pois ao considerar significativas mudanças climáticas que ocorreram no Quaternário, muitos dos calcretes presentes podem ter sido formados em respostas a paleoclimas. Os mesmos autores comentam que alguns solos cálcicos no vale do rio Arkansas no Colorado (EUA) refletem episódios cíclicos de acumulação de carbonatos de climas áridos e registro da ação da lixiviação em climas mais úmidos.

Dal' Bó e Basilici (2010) investigaram alguns paleossolos da Formação Marília, entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Goiás (Brasil), visando a compreensão de regimes climáticos do passado nesta região. Para isso, utilizaram dois tipos de horizontes de paleossolos: 1 - o horizonte cálcico (Bk), apontado como uma feição pedológica que indica a concentração e remobilização secundária de carbonato de cálcio, atribuídas a climas áridos e semiáridos; 2 – o horizonte argílico (Bt), estudado a partir do índice de alteração química, considerando que sua formação requer climas mais úmidos. Neste último ocorre a iluviação de argilas, isto é, a translocação das partículas de argilas para horizontes subjacentes do perfil, conduzidas pelas frentes de molhamento, sendo retidas nos agregados ou paredes dos poros do solo.

Esse estudo foi capaz de afirmar a existência de dois momentos distintos de evolução paleoclimática da Formação Marília, um caracterizado por momentos de maior aridez e outro com maior umidade, sendo o último com volume pluviométrico suficiente para a lixiviação dos carbonatos e iluviação de argilas (DAL' BÓ e BASILICI, 2010). Reheis (1987) reforça que horizontes cálcicos que contêm feições de argila translocada são frequentemente interpretados como decorrente de mudanças climáticas. Trabalhos semelhantes também foram desenvolvidos, como: Khormali et al. (2003), a partir de solos formados sobre calcário no sul do Irã; Owliaie et al. (2018) no sudeste do Irã; Becze-Deak et al. (1997) em solos de loess na Europa; Reheis (1987) em solos numa área semiárida no centro-sul de Montana (EUA); Eghbal e Southard (1993) em solos no deserto do Mojave, na Califórnia (EUA), entre outros.

### **3.5. Calcretes e os carbonatos continentais**

Há, de fato, forte proximidade conceitual entre calcrete e horizontes cálcicos/petrocálcicos (k), exceto pelo fato destes últimos requererem critérios

dimensionais/quantitativos, já citados anteriormente. Alonso-Zarza e Wright (2010a) trazem uma pequena discussão sobre a relação entre um horizonte “k” e o calcrete em solos.

Calcrete é um termo geral dado à precipitação e acumulação de carbonato, usado para significar não apenas materiais altamente endurecidos e maciços, mas também inconsolidados, ocorrendo em uma grande variedade de formas, seja material pulverulento, nodular, laminar e maciço (WRIGHT, 2007). O termo calcrete é efetivamente sinônimo de caliche, que tende a ser mais amplamente usado na América do Norte.

Na formação de calcretes, o  $\text{CaCO}_3$  promove a cimentação dos materiais residuais, ocorrendo em ambiente continental e próximos à superfície, sendo controlados por condicionantes paleoambientais, geralmente associados a climas áridos e semiáridos. Os calcretes podem ser pedogênicos, mas também gerados pela ação da água subterrânea (oscilações do nível freático), denominados calcretes freáticos (WRIGHT e TUCKER, 1991; ALONSO-ZARZA, 2003) ou geogênicos (KHORMALI et al., 2006; DAL' BÓ e BASILICI, 2010).

Os calcretes pedogenéticos se formam dentro dos solos, a partir da redistribuição do carbonato de cálcio associado a processos eluviais/iluviais (WRIGHT e TUCKER, 1991; TANDON e ANDREWS, 2001; ALONSO-ZARZA, 2003), e sua gênese corresponde às etapas descritas para formação de horizontes cálcicos/petrocálcicos em ambientes áridos e semiáridos.

Os calcretes de água subterrânea ou freáticos estão relacionados a sistemas aquíferos superficiais (rasos), estando posicionados em baixa profundidade, em torno da franja capilar, ou abaixo, de acordo com o movimento lateral da água, onde possivelmente ocorrerá a precipitação dos carbonatos (WRIGHT e TUCKER, 1991; TANDON e ANDREWS, 2001; ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010a).

A precipitação do carbonato é desencadeada por vários fatores: desgaseificação de  $\text{CO}_2$  com redução/perda de  $\text{CO}_2$ , evaporação/evapotranspiração e a adição de  $\text{Ca}^{2+}$  que é efeito do íon comum por excesso de cálcio (WRIGHT e TUCKER, 1991; ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010a). Alonso-Zarza (2003), ao citar algumas pesquisas realizadas, admite que os calcretes freáticos estejam numa profundidade de centímetros até alguns metros, raramente ultrapassando 10 metros.

Em todos os casos, os calcretes das águas subterrâneas ocorrem em climas áridos e semiáridos (ALONSO-ZARZA, 2003). Mann e Horwitz (1979) afirmam que às condições climáticas áridas/semiáridas são importantes na produção desse tipo de calcrete, pois sob situações contínuas de excesso de umidade, qualquer carbonato acumulado tende a ser dissolvido e removido do perfil e, eventualmente, da paisagem, em vez de ser concentrado em

locais específicos. Em segundo lugar, chuvas intensas e intermitentes (mal distribuídas) tendem a desenvolver sistemas de água subterrânea melhores, devido à infiltração e recarga mais eficazes (adequado para o transporte lateral de íons cálcio e carbonato para o local de acumulação), do que a precipitação bem distribuída ao longo do ano, como normalmente ocorre em climas mais úmidos. Em terceiro lugar, altas taxas de evaporação e evapotranspiração, típicos dos climas mais secos, são essenciais para a produção e concentração de íons cálcio na água, necessária para a precipitação química direta do carbonato (MANN e HORWITZ, 1979).

As características morfológicas dos calcretes pedogênicos e freáticos são significativamente variadas, tornando, muitas vezes, o trabalho de distinção entre os dois bastante difícil (ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010a). Vale frisar que muitos calcretes são difíceis de interpretar, uma vez que é possível a existência de calcretes formados anteriormente, que foram retrabalhados e submetidos a múltiplos ciclos climáticos (SCHAETZL e ANDERSON, 2005).

Do ponto de vista das implicações ambientais, consideram-se para os calcretes, as mesmas apresentadas pelos horizontes cálcicos/petrocálcicos. Por exemplo, Aristarain (1970) afirma que a formação de um perfil de calcrete pode levar ao aumento do movimento lateral da água durante chuvas intensas, promovendo a erosão dos horizontes superiores. Wright (2007) aponta que o calcrete pode ser uma barreira para infiltração e para o crescimento do sistema radicular das plantas. O autor afirma que o desenvolvimento do calcrete pode influenciar o desenvolvimento das formas, visto que a redução da infiltração pode desencadear processos morfodinâmicos na superfície, como a erosão e até movimentos de massa.

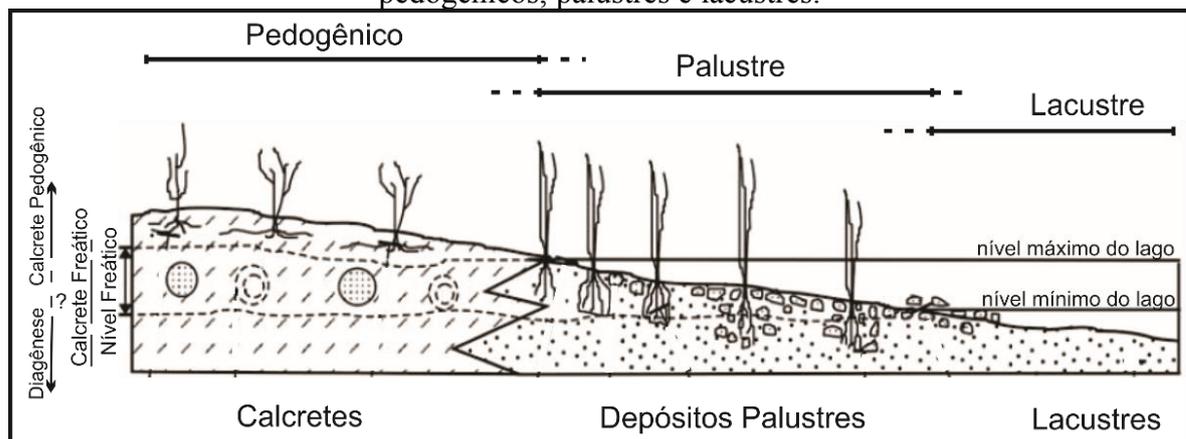
Além de calcretes pedogênicos e freáticos, há também no contexto dos carbonatos secundários a formação de carbonatos palustres, associados às áreas em torno de lagos e/ ou pântanos, por exemplo. A deposição de carbonatos palustres está atrelada à gradientes muito baixos e reduzida energia, como nas margens de uma área alagada, onde os carbonatos de grão fino são formados em água doce, que comumente contêm os restos de carófitas, ostracodes e moluscos, que são expostos aos processos subaéreos relacionados às flutuações no nível da água, sujeitas à ciclos de umedecimento e secagem (ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010b). Nesse sentido, os climas muito áridos ou muito úmidos não favorecem a formação desses carbonatos palustres, enquanto climas semiáridos a subúmidos com sazonalidade acentuada são mais apropriados (SANZ et al., 1995; ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010b).

Várias faces podem se formar com esses carbonatos, entre elas: a) calcários mosqueados, com textura micrítica carbonática e manchas amarela-laranja-avermelhada; b) calcários nodulares e brechados, com nódulos micríticos irregulares de escala centimétricas; c) calcários

com cavidades radiculares verticais, ricos em conchas de gastrópodes, carófitos, ostracodes, e rachaduras de dessecação, com estruturas fenestrais (aberturas mais largas do que interstícios suportados pelos grãos) e alveolares; d) calcários com pseudomicrokarst, que possuem cavidades irregulares e complexas que se assemelham a um sistema cárstico no qual as cavidades são pequenas (centimétricas e associadas a redes maiores na escala de decímetros), na maior parte cilíndricas e alongadas verticalmente; e) calcários peloidais, grãos revestidos ou intraclastos, entre outras faces (ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010b).

A Figura 14 apresenta três microambientes associados ao contexto transicional para formação dos carbonatos palustres, calcretes pedogênicos e freáticos, além de carbonatos lacustres, revelando significativa complexidade, capazes de produzir diversas características morfológicas semelhantes nos materiais, principalmente nos dois primeiros.

Figura 14 - Contexto ambiental para formação de depósitos palustres: microambientes pedogênicos, palustres e lacustres.



Fonte: adaptado de Alonso-Zarza (2003).

Analisando a Figura 14, observa-se que a variação do nível de água do lago é fator determinante na formação dos depósitos palustres, e que, pelas circunstâncias apresentadas, há de se esperar materiais capazes de causar controvérsia/dúvida sobre sua verdadeira gênese. Os depósitos palustres são afetados pela pedogênese quando os materiais são expostos a condições atmosféricas, também podem ser retrabalhados (mecanismos físicos, químicos e biogênicos) quando submetidos à influência temporária da água. Tandon e Andrews (2001) apresentam materiais com associação genética palustre-calcrete, discutindo os processos que convertem calcários palustres em calcretes. Os citados autores afirmam que a distinção entre carbonato palustre e calcrete é difícil, pois em ambos há marcas de atividades pedogênicas e freáticas, embora em graus variados. Wright e Tucker (1991) também apontam a significativa dificuldade para distinção entre estes materiais carbonáticos.

Outros carbonatos continentais que podem estar associados ou dividindo porções espaciais em um determinado ambiente são os tufos calcários. Os tufos ou travertinos meteógenos são produtos de precipitações de carbonato de cálcio a partir de soluções aquosas na superfície ou subsuperfície, sob regimes de água doce e fria, próximo à temperatura ambiente, onde tipicamente contém restos de macrófitas, invertebrados e bactérias (PENTECOST e VILES, 1994; FORD e PEDLEY, 1996; VILES e PENTECOST, 2007). Em regiões mais secas o desenvolvimento de tufo, dada a especificidade de sua gênese, coincide com paleoclimas mais úmidos, principalmente durante o Quaternário (VILES e PENTECOST, 2007), diferente dos outros carbonatos continentais (calcretes e palustre), associados a climas mais secos.

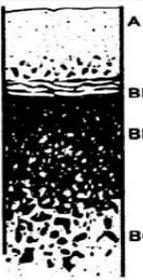
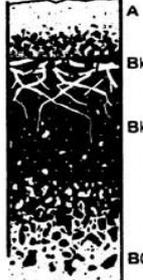
De acordo com Capezzuoli et al. (2014) a deposição dos tufos está sempre associada ao crescimento de cristais de calcita envolvendo águas subterrâneas ricas em  $\text{CO}_2$  e supersaturadas em íons de cálcio. Conforme a água flui para longe do ponto de ressurgimento, o dióxido de carbono escapa para a atmosfera e conduz a solução supersaturada em favor da precipitação de calcita. Para os autores, os ambientes propícios para sua formação são as nascentes, os cursos d'água e, eventualmente, os ambientes marginais lacustres e pantanosos.

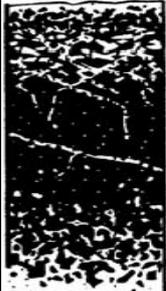
Os tufos possuem textura terrosa e geralmente possuem porosidade muito alta (FORD e WILLIAMS, 2007), sendo que o componente biológico muitas vezes contribui de forma marcante, com plantas e biofilmes fornecendo núcleos para deposição e às vezes auxiliando na necessária degaseificação ou remoção de  $\text{CO}_2$  via fotossíntese (VILES e PENTECOST, 2007). Além dos tufos porosos, precipitados em substratos orgânicos como galhos, folhas e musgos, Janssen et al. (1999) aponta outras duas feições macroscópicas, são elas as granulares, contendo pequenas partículas de plantas incrustadas, que foram erodidos de depósitos mais antigos e redepositadas; e as crostas carbonáticas laminadas, formadas por laminações horizontais associadas a cianobactérias alternando com precipitados carbonáticos.

### **3.6. Etapas evolutivas de perfis de solos cálcicos e calcretes**

Para melhor compreensão sobre a evolução dos solos cálcicos e calcretes, cabe discutir aspectos morfológicos que auxiliam no diagnóstico das etapas do processo de formação, verificados a partir de importantes concepções retratadas em trabalhos que contribuíram para o entendimento sobre a evolução dos calcretes em climas áridos e semiáridos (GILE et al., 1966; BACHMAN AND MACHETTE, 1977; MACHETTE, 1985); ALONSO-ZARZA et al., 1998). As referidas concepções são sintetizadas no Quadro 3:

**Quadro 3** - Características morfológicas associadas as etapas evolutivas de acumulação de carbonatos), observadas em solos cálcicos e calcretes pedogênicos desenvolvidos sobre materiais com menos de 20% de cascalhos em climas áridos e semiáridos.

	Figuras (Schaetzl e Anderson, 2005).	Concepções: <b>a</b> - Gile et al. (1966); <b>b</b> – Bachman and Machette (1977); <b>c</b> - Machette (1985); <b>d</b> - Alonso-Zarza et al. (1998)	
Estágio 01		<p><b>a</b> - Poucos filamentos ou revestimentos fracos</p> <p><b>b</b> - Filamentos ou revestimentos fracos</p> <p><b>c</b> - Alguns filamentos no solo ou revestimentos fracos nas faces dos agregados.</p> <p><b>d</b> - Precipitação de carbonato ao longo de raízes e pelos radiculares, resultando em um controle vertical da acumulação de carbonato.</p>	Solos Cálcicos, de acordo com Machette (1985).
Estágio 02		<p><b>a</b> - Nódulos poucos a comuns</p> <p><b>b</b> - Nódulos firmes de carbonato, poucos a comuns, mas isolados um do outro.</p> <p><b>c</b> - Nódulos macios, com 0,5 cm a 4 cm de diâmetro.</p> <p><b>d</b> - Formação de pelóides e grãos revestidos. Material friável. Ocorre em áreas descontínuas dentro do perfil.</p>	
Estágio 03		<p><b>a</b> - Muitos nódulos e preenchimento internodular</p> <p><b>b</b> - Nódulos coalescidos disseminados em matriz de carbonato.</p> <p><b>c</b> - Muitos nódulos coalescidos, a matriz é firme a moderadamente cimentada.</p> <p><b>d</b> - Formação progressiva de nódulos duros de carbonato com tamanhos e morfologias variáveis. Há também coalescência parcial de nódulos, mas em um horizonte ainda friável</p>	
Estágio 04		<p><b>a</b> - Incremento na impregnação por carbonato. Horizonte laminar sobrejacente ao horizonte obstruído.</p> <p><b>b</b> - Estrutura em placas, matriz maciça. Nódulos raros podem ser visíveis em alguns lugares. Obstrução. Pode ter lâminas incipientes na superfície superior.</p> <p><b>c</b> - Estrutura laminada - lâminas finas (&lt;0,2 cm) a moderadamente grossas (1 cm) na parte superior do horizonte Km (endurecido/cimentado).</p> <p><b>d</b> - A precipitação de carbonatos é muito intensa e progressivamente o horizonte é endurecido e a porosidade é reduzida (horizonte maciço). Ocorre em decorrência do crescimento e coalescência de nódulos.</p>	Calcretes Pedogênicos (solos cálcicos endurecidos), de acordo com Machette (1985).
Estágio 05		<p><b>a</b> - Estágio Inexistente</p> <p><b>b</b> - Estrutura em placas a tabular, denso e firmemente cimentado. Camada laminar bem desenvolvida na parte superior. Pode ter pisólitos espalhados na zona laminar</p> <p><b>c</b> - Lâminas grossas (&gt; 1 cm) e pisólitos finos a grossos. As faces e fraturas verticais são revestidas com carbonato.</p> <p><b>d</b> - Os sistemas radiculares não podem penetrar facilmente no horizonte maciço, e tendem a se estender lateralmente. Formação de horizonte laminar na zona superior.</p>	
Estágio 06		<p><b>a</b> – Estágio Inexistente</p> <p><b>b</b> - Maciço, multilaminar e brechado, com pisólitos comuns.</p> <p><b>c</b> - Várias gerações de lâminas, brechas, pisólitos e recimentações. Muitas superfícies endurecidas (revestimentos)</p>	

	<p><b>d - 6-A.</b> Se a erosão e sedimentação estiverem em equilíbrio. Neste caso, ocorre retrabalho e a brechação do horizonte laminar ou de todo o perfil.</p> <p><b>6-B.</b> Se a deposição é maior que a erosão. Tem-se a formação de novos horizontes sobrejacentes, gerando perfis compostos de calcrete.</p> <p><b>6-C.</b> Se a erosão é maior que a sedimentação. Neste caso, a parte superior do perfil calcrete é removida e o horizonte laminar é diretamente exposto à atmosfera.</p>	
---	--	--

Conforme apresentado no Quadro 3, o aparecimento de determinadas feições morfológicas contribui no diagnóstico dos estágios evolutivos dos solos com horizontes cálcicos e perfis de calcretes. No estágio 1 a calcificação é apresentada a partir de tênues filamentos e fracos revestimentos nas faces dos agregados. Na etapa 2 ocorre o aparecimento de poucos nódulos, predominantemente macios e pequenos grãos micríticos esféricos (pelóides), distribuídos esparsamente na massa do solo.

No estágio 3 ocorre alta frequência de nódulos, predominantemente rígidos e muitos coalescidos, mas sobre material ainda friáveis, constituindo, de acordo com Machette (1985), a etapa final para solos cálcicos, com tendência progressiva para formação de calcrete. Nestes três estágios a precipitação de carbonatos tem um forte componente biológico, sendo que parte dos filamentos e nódulos ocorrem em estreita associação com raízes e microrganismos (ALONSO-ZARZA e WRIGNT, 2010).

A matéria orgânica e os microrganismos não podem ser separadas do processo de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nos solos. No caso de cristais de calcita aciculares, por exemplo, alguns hábitos parecem estar relacionados à biomineralização de hifas fúngicas específicas e da calcificação de bactérias que, após morte e decomposição, liberam a calcita no meio (MONGER et al., 1991; VERRECCHIA e VERRECCHIA, 1994). O mecanismo pelo qual os microrganismos produzem calcita é provavelmente relacionado ao excesso de  $\text{Ca}^{2+}$  sendo excretado por microrganismos, que concentram este íon em suas superfícies externas, além da produção de  $\text{CO}_2$  pela respiração microbiana, contribuindo para a formação de íons de bicarbonato, o que leva à precipitação de calcita (MONGER et al., 1991).

No estágio 4, a continuidade na calcificação torna possível que os solos cálcicos formem definitivamente calcretes pedogênicos (MACHETTE, 1985), com o total ou parcial endurecimento do material, gerado principalmente pela progressiva coalescência de nódulos. Ainda neste estágio pode aparecer uma incipiente camada (inferior a 1cm) com estrutura laminar na parte superior do horizonte cimentado. No estágio 5 há a consolidação de material carbonático com estrutura placosa (tabular ou ondulada), que pode chegar a vários centímetros

de espessura - *platy horizon* de acordo com Wright (2007) e Alonso-Zarza (2003). Estes materiais carbonáticos consolidados e impermeáveis constituem o que se denominou de horizonte *hardpan* ou petrocálcico (WRIGHT, 2007). O último estágio constitui retrabalhamentos a partir de múltiplos episódios de brechação, recimentação e formação de pisólitos, além de sobreposições de camadas laminares.

Alonso-Zarza et al. (1998) aponta que a condição de brechação e retrabalho só ocorrerá com o relativo equilíbrio entre a erosão e a sedimentação no local do perfil, pois se a sedimentação for maior haverá a formação de perfis compostos, e quando a erosão for maior os horizontes maciços ficarão expostos.

Esta sequência morfológica de estágios reflete as diferentes etapas evolutivas, mas é importante considerar que os perfis em campo podem apresentar grande complexidade, já que em perfis clássicos apresentados por Alonso-Zarza et al. (2003), solos cálcicos geralmente recobrem calcretes bastante evoluídos, tendo presença de diversos estágios em apenas um perfil. Também é possível perfis compostos e calcretes pedogênicos recobrindo calcretes freáticos, ampliando a complexidade morfológica.

### **3.7. Micromorfologia de solos com acumulação de carbonato de cálcio**

A análise micromorfológica de solos realizadas a partir de seções delgadas tem sido aplicada na resolução de problemas relacionados à pedogênese e como ferramenta auxiliar na classificação de solos, sendo eficiente na identificação de alguns processos e horizontes diagnósticos. Os estudos micromorfológicos também contribuem em pesquisas sobre paleoclimas e mudanças ambientais, haja vista que condições específicas na organização dos componentes do solo podem apontar mudanças climáticas ocorridas, além disso, possui importantes aplicações na arqueologia e nos estudos sobre manejo e conservação de solos (STOOPS, 2010).

A micromorfologia tem sido utilizada para compreender a conjuntura morfológica e a organização hierárquica de feições pedológicas calcíticas através da interpretação de seções delgadas, permitindo auxiliar no entendimento sobre as influências climáticas, geoquímicas e biológicas no processo de dissolução, precipitação e recristalização de carbonatos em solos. Os carbonatos podem ser facilmente reconhecidos em seções delgadas de solo devido sua extrema birrefringência óptica, além de serem caracterizados pelo alto relevo, de fortemente negativo para fortemente positivo, dependendo de sua orientação (DURAND et al., 2010). Em áreas áridas e semiáridas, as mudanças climáticas são registradas principalmente na fábrica ou trama

e na composição dos horizontes cálcicos, constituindo, a partir do estudo micromorfológico, indicadores para compreensão do clima passado e das mudanças ambientais (STOOPS, 2010).

A análise micromorfológica é aplicada também na distinção entre calcita pedogênica, atrelada a processos pedogenéticos e a calcita geogênica, associada a mecanismos envolvendo a atuação da água subterrânea (KHORMALI et al., 2006; SHANKAR e ACHYUTHAN, 2007):

Durand et al. (2010) apontam que muitas expressões utilizadas na micromorfologia de solos calcíticos são provenientes da petrografia sedimentar, entre as quais há destaque para os termos: micríta, cristal com tamanho  $<4 \mu\text{m}$  de diâmetro; microesparítica, diâmetro entre 5 e  $20 \mu\text{m}$ ; e esparítica, com tamanho  $> 20 \mu\text{m}$ .

Os autores supracitados destacam importantes pedofeições associadas a horizontes cálcicos e/ou petrocálcicos, com grande relevância nos estudos micromorfológicos, são eles:

- 1) Revestimentos, frequentemente compostos por calcita micríta, por vezes microesparítica e menos frequentemente esparítica, que revestem grãos (fragmentos grossos), paredes de poros e superfície de agregados. Entre os tipos de revestimento destacam-se os pingentes, que constituem depósitos cônicos que irradiam para baixo, a partir das superfícies inferiores de grãos maiores presentes no solo;
- 2) Hipo-revestimento e quase-revestimento<sup>6</sup> de carbonato de cálcio, são impregnações do fundo matricial do solo compostas por carbonatos micríticos e microesparíticos, formado pela rápida precipitação de carbonato de cálcio a partir de soluções que percolam os poros;
- 3) Preenchimentos<sup>7</sup> carbonáticos, formados por material calcítico, com destaque para as calcitas fibrosas-aciculares (medindo poucos micrómetros de largura até várias centenas de micrómetros de comprimento), que ocupam todos os tipos espaços vazios, sejam eles poros, planos ou canais;
- 4) Nódulos de carbonatos, são bastante comuns e ocorrem em uma ampla variedade de formas, muitos deles são formados por acumulações de calcita microcristalina e podem exibir uma estrutura floclulenta que aparece como aglomerados irregulares ou arredondados coalescentes, com trama interna micrítica homogênea ou mosqueada, dependendo da quantidade de argila ou óxidos de ferro presentes;

---

<sup>6</sup> Hipo-revestimento (*Hypocoating*) podem ser desenvolvidos em torno, imediatamente próximo, da zona de superfície de um grão ou agregado, já o Quase-revestimento (*Quasicoatings*) não estão imediatamente próximos das superfícies a que são referidos, mas ocorrem a alguma distância (CASTRO e COOPER, 2019; STOOPS, 2021).

<sup>7</sup> Os Preenchimentos (*Infillings*) são poros, preenchidos ou parcialmente preenchidos, por material do solo ou alguma fração dele. Para ser classificado como “preenchimento denso” em vez de um “revestimento” os poros devem ser mais de 90% preenchido (STOOPS, 2021).

- 5) Feições relacionadas a raízes, que representam a petrificação de células radiculares pela calcita ou a precipitação de carbonatos em torno de raízes, como por exemplo, a calcificação de pelos radiculares e a formação de rizólitos;
- 6) Filamentos calcificados, que são estruturas filiformes, ramificadas ou não, formadas por cristais de calcita que replicam o crescimento micelial de hifas fúngicas, com diâmetro com cerca de 4  $\mu\text{m}$  e comprimentos maiores que 100  $\mu\text{m}$ ;
- 7) Intercrescimento de cristais biogênicos, como os grânulos de carbonato de cálcio produzidos por minhocas, com tamanho de 0,1 a 2,5mm, formados por agregados de cristais individuais de calcita. Também os esferulitos, constituídos de carbonato de cálcio, medindo entre 5 e 15  $\mu\text{m}$ , produzidos como resultado de processos digestivos de muitos animais, com destaque para herbívoros (esferulitos fecais), além de restos de moluscos.

No nordeste do Marrocos, Ducloux e Laouina (1989) identificaram revestimentos por pingentes em calcretes, típicos de um clima semiárido, formados por calcita acicular desenvolvida abaixo de calhaus com sucessivas cristalizações para o exterior, sugerindo que os carbonatos não proviriam de fontes externas, mas resultariam do desgaste do próprio calhau ou cascalho. Esta condição cria uma sequência mineralógica evolutiva com diferenciação centrífuga. Khormali et al. (2006) afirmam que pendentes são características conspícuas em solos de climas áridos e semiáridos que tem material parental rico em carbonato.

Revestimentos, hipo-revestimentos, preenchimentos e nódulos são as formas de precipitação carbonáticas descritas por Moazallahi e Farpoar (2009) em perfis de solos estudados ao longo de uma sequência topográfico-climática (índices pluviométricos entre 151 e 227) no Irã. Os autores apontam que os nódulos de calcitas se tornam dominantes com aumento da umidade, em direção às porções mais altas do relevo.

Wright (1984) aponta que a presença de preenchimentos de calcita fibrosa-acicular é um importante marcador climático de ambientes com baixo índice pluviométrico, afirmando que esta pedofeição pode ocorrer em uma variedade de tipos de solos, mas sua preservação como um componente significativo é apenas provável em solos sob condições áridas e semiáridas, onde não são lixiviados.

Owliaie et al. (2018) investigaram solos em uma região semiárida no sudoeste do Irã, e apontaram a ocorrência de iluviação de argilas e remoção de carbonatos em alguns perfis de solo com superfície geomórfica mais estável, na qual a análise micromorfológica mostrou calcita revestida com filmes de argila, indicando clima mais úmido no passado, durante o Quaternário. Em outras seções delgadas há revestimentos de calcita sobrepostos a revestimentos

de argila, indicando processos de recalcificação, apontando para a mudança de um clima mais úmido para mais seco.

A ocorrência de revestimentos de calcita sobre argilas iluviadas como indicador de mudança climática também é retratada por Gile et al. (1966); Reheis (1987); Becze-Deak et al. (1997); Khormali et al. (2006); Dal' Bó e Basilici (2010), entre outros. A abundância de pedofeições relacionadas às raízes calcificadas (células radiculares calcificadas) podem ser importantes indicadores de uma longa estabilidade da superfície do solo durante condições climáticas favoráveis, assim como biosferóides de minhocas fornecem argumentos para uma relativa estabilidade da superfície do solo, sem processos de enterramento rápido ou estresse hídrico drástico e prolongado (BECZE-DEAK et al., 1997).

As raízes das plantas e os microrganismos associados desempenham um papel muito importante na formação de horizontes cálcicos (MONGER et al., 1991; VERRECCHIA e VERRECCHIA, 1994; BAJNÓCZI e KOVÁCS-KIS 2006; ALONSO-ZARZA, 2018). Verrecchia e Verrecchia (1994) afirmam que a precipitação de carbonatos é produto de interações complexas entre a litosfera superficial e a biosfera, ressaltando que a matéria orgânica e a atividade de microrganismos são muito importantes no processo de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nos solos. O mecanismo pelo qual os microrganismos produzem calcita é provavelmente relacionado ao excesso de  $\text{Ca}^{2+}$  sendo excretado por microrganismos, que concentram este íon em suas superfícies externas, além da produção de  $\text{CO}_2$  pela respiração microbiana, contribuindo para a formação de íons de bicarbonato, o que leva à precipitação de calcita (MONGER et al., 1991).

O tamanho dos cristais de calcita em nódulos pode ser um importante indicador de idade relativa. Para Alonso et al. (2004), nódulos calcíticos micríticos apontam para uma formação relativamente jovem, como observado pelos autores em paleossolos formados sobre terraços na bacia do rio Tormes na Espanha, datados do Pleistoceno Inferior (<50.000 anos), enquanto a calcita esparítica está em maior abundância nos solos com idades relativamente mais antigas, como verificado em terraços do Pleistoceno Médio e Inferior (> 300.000 anos).

Shankar e Achyuthan (2007), a partir de estudos sobre a formação de calcretes em solos no sul da Índia, sugerem seis estágios de desenvolvimento dos horizontes cálcicos e petrocálcicos por observação microscópica. O primeiro estágio é a dissolução do carbonato de cálcio dos horizontes superiores seguido de seu transporte para baixo, e o segundo seria a precipitação (recristalização) como cristais de calcita micrítica e acicular, afetando particularmente as paredes dos canais e poros, dando origem a hipo-revestimentos e preenchimentos. Este processo é progressivo, e sua continuidade culmina na formação de

nódulos carbonáticos. O terceiro estágio é representado pela coalescência parcial de nódulos, dando origem a um horizonte nodular endurecido, mas ainda friável. No quarto estágio, a precipitação de carbonatos seria muito intensa, ocorrendo ao longo da parte mais alta do horizonte nodular calcítico, sendo progressivamente endurecido com redução da porosidade (formação de horizonte laminar petrocálcico). No quinto estágio, as raízes das plantas induzem intemperismo mecânico e químico, degradação do topo do horizonte laminar e formação brechas petrocálcicas. O último estágio corresponde a elevação da taxa de erosão, onde a parte superior do perfil é removida e o horizonte petrocálcico é exposto diretamente à atmosfera.

#### **4. A COBERTURA PEDOLÓGICA EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA NO MÉDIO CURSO DO RIO SALITRE**

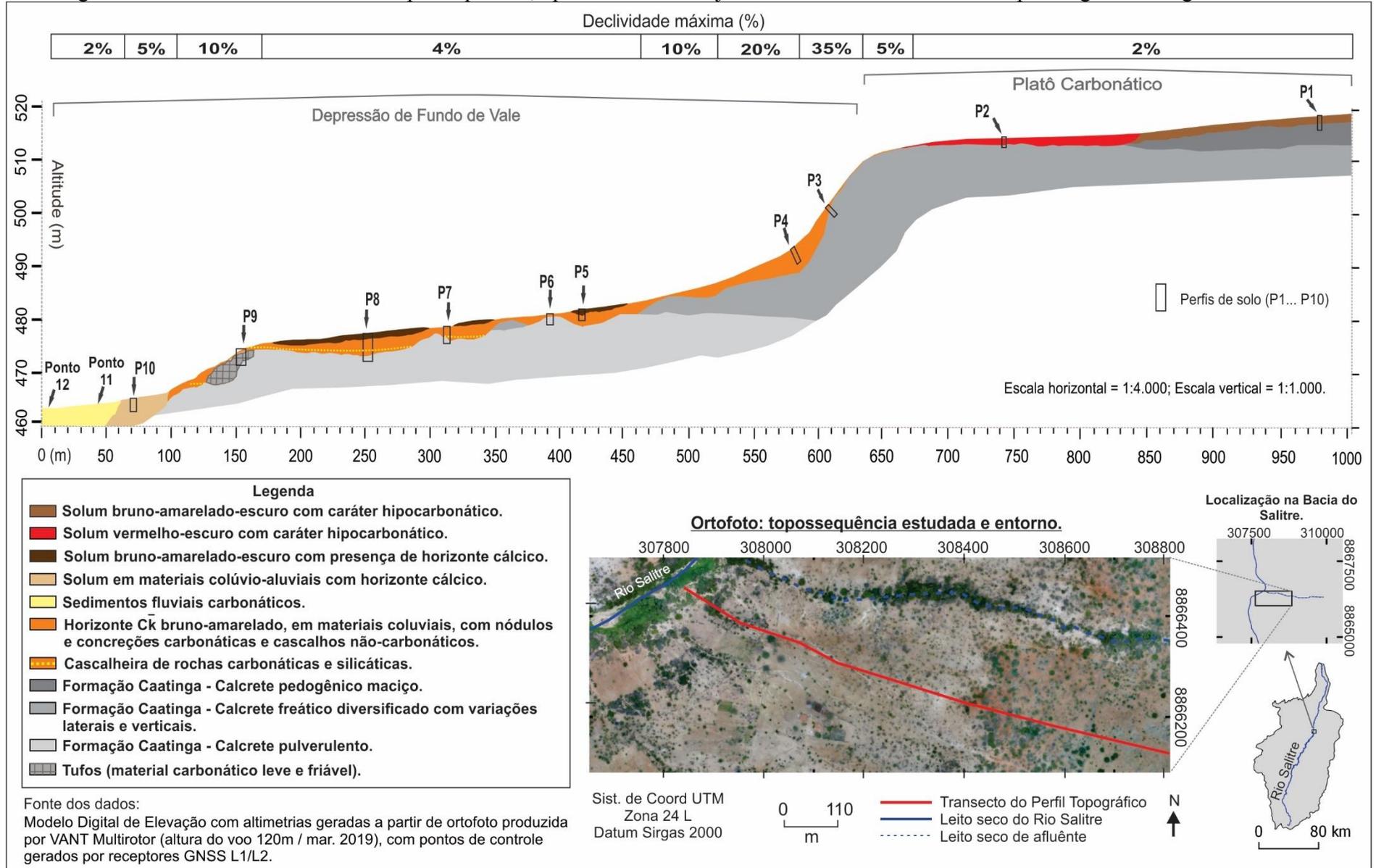
Este capítulo tem como objetivo caracterizar os materiais e sua organização nas vertentes, com base em um estudo analítico da organização bidimensional da cobertura pedológica em uma topossequência representativa das condições pedogeomorfológicas da área de estudo. Ao longo da topossequência foram coletadas amostras de materiais em 12 pontos distintos (P1 a P12), sendo 10 perfis de solo para estudo da organização vertical e lateral (P1 a P10, em ordem, do topo para baixa vertente) e 02 pontos para coleta de amostras de sedimentos na primeira camada no leito seco do rio Salitre (P11 e P12).

##### **4.1. A cobertura pedológica: atributos físicos e morfológicos dos materiais na vertente.**

Os aspectos físicos e morfológicos da cobertura pedológica foram descritos em três subtópicos: i) materiais do platô, em condições pedogeomorfológicas distintas das demais, que mostram a presença de elúvios, isto é, nos quais os solos desenvolveram-se diretamente das rochas sotopostas; ii) materiais no interior da dfv associados a solos desenvolvidos a partir de colúvios e alúvios, investigados a partir dos horizontes superiores e intermediários, de cores brunadas; e, iii) os materiais no interior da depressão que estão na base dos perfis, de coloração esbranquiçada, que marcam descontinuidades de materiais de origem em relação aos horizontes superficiais.

Foi confeccionado um perfil topográfico bidimensional ao longo de uma vertente, apresentado na Figura 15, exibindo a configuração geral da cobertura pedológica (organização vertical e lateral), que será detalhadamente caracterizada e discutida nos subtópicos a seguir.

Figura 15 - Perfil bidimensional da topossequência, apresentando arranjo vertical e lateral da cobertura pedológica ao longo da vertente.



#### 4.1.1. Materiais no platô: solos como elúvios

Foram encontrados em pontos variados do platô (afastado aproximadamente 400m do ombro da vertente) afloramentos do calcrete maciço da Formação Caatinga. Em um destes foi implantada uma pedreira (atualmente desativada) para retirada de material utilizado na indústria de mármore<sup>8</sup> (localizado em 309324E / 8862347N – Zona 24L), onde foi possível visualizar o aspecto geral da morfologia do calcrete (FIGURA 16-A). Trata-se de um material litificado (*hardpan*) com granulação muito fina (micrítica) e densidade relativamente alta, com presença de glóbulos arredondados de natureza pedogênica e tamanhos variados (PENHA 1994; RIBEIRO et al., 2002), cor amarelo claro a bruno-amarelo-claro. Acima deste material (FIGURA 15) foi aberto o Perfil 1 (P1). Na sua base, o horizonte petrocálcico encontra-se fragmentado.

Figura 16 - Litologias presentes na borda do platô carbonático.



Na borda do platô, próximo ao ombro da vertente, foram encontrados afloramentos de paraconglomerados com clastos arredondados com composição e tamanho variados,

<sup>8</sup> Parte do calcrete da Formação Caatinga é reconhecido, do ponto de vista comercial, como “Mármore Bege Bahia”, bastante extraído no alto curso da bacia do Salitre no município de Ourolândia-BA (Ribeiro et al., 2002).

predominantemente de rochas siliciclásticas e unidos por um cimento carbonático (FIGURA 16-B), bem como calcretes que possuem matriz carbonática envolvendo grãos de quartzo, com coloração variando entre branco e acinzentado (FIGURA 16-C). Estes afloramentos estão sendo destruídos pelo avanço dos processos de vertente (avanço das cabeceiras das feições erosivas lineares) e lentamente conduzidos encosta abaixo, até o leito do rio Salitre.

Na borda do platô foi aberto o perfil P2 (FIGURA 15), onde ocorre um solo de cor avermelhada (10R 3/6 a 10R 4/6) sobre blocos rochosos subangulares do calcrete, relativamente alongados horizontalmente, com aproximadamente 20 a 50 cm de diâmetro no eixo maior. Testes de campo, com ácido clorídrico (HCl 10%) apontaram efervescência do material. Por associação geológica, e com base no aspecto macropetrográfico e microscópico, trata-se de possíveis calcretes freáticos. Mas é sempre válido ressaltar a complexidade na evolução de calcretes, que ao longo do tempo passa por transformações influenciadas pelas oscilações no clima e mudanças na topografia, no qual calcretes freáticos podem receber fortes influências de agentes pedológicos e posteriormente (mais uma vez) freáticos, conferindo uma origem poligenética.

Do ponto de vista da cobertura pedológica, há semelhanças físicas e morfológicas entre os materiais do platô, representados pelos perfis P1 e P2. De forma geral, os perfis são pouco desenvolvidos, com profundidades do *solum* inferiores a 70cm (Tabela 2), textura franco-argiloarenosa e mais de 500 g kg<sup>-1</sup> de areia (alto para os padrões da área), além dos menores valores de silte encontrados, com destaque para Bik1 (P1) e Bik2 (P2), com 135 e 137 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Nos dois perfis também foram encontrados valores inferiores a 70 g kg<sup>-1</sup> de cascalho/calhau (baixos teores em comparação com outros perfis na topossequência), além dos mais baixos valores da relação silte/argila apresentados em toda área, 0,44 e 0,39 nos horizontes Bik1 (P1) e Bik2 (P2), respectivamente. As estruturas também são semelhantes, com predominância de blocos subangulares. Ainda assim, tais propriedades indicam que os solos do platô possuem o maior grau de desenvolvimento ao longo de toda topossequência, mesmo com o baixo grau de maturidade pedogenética destacado (mais informações sobre a morfologia dos perfis de solo consultar o Apêndice B).

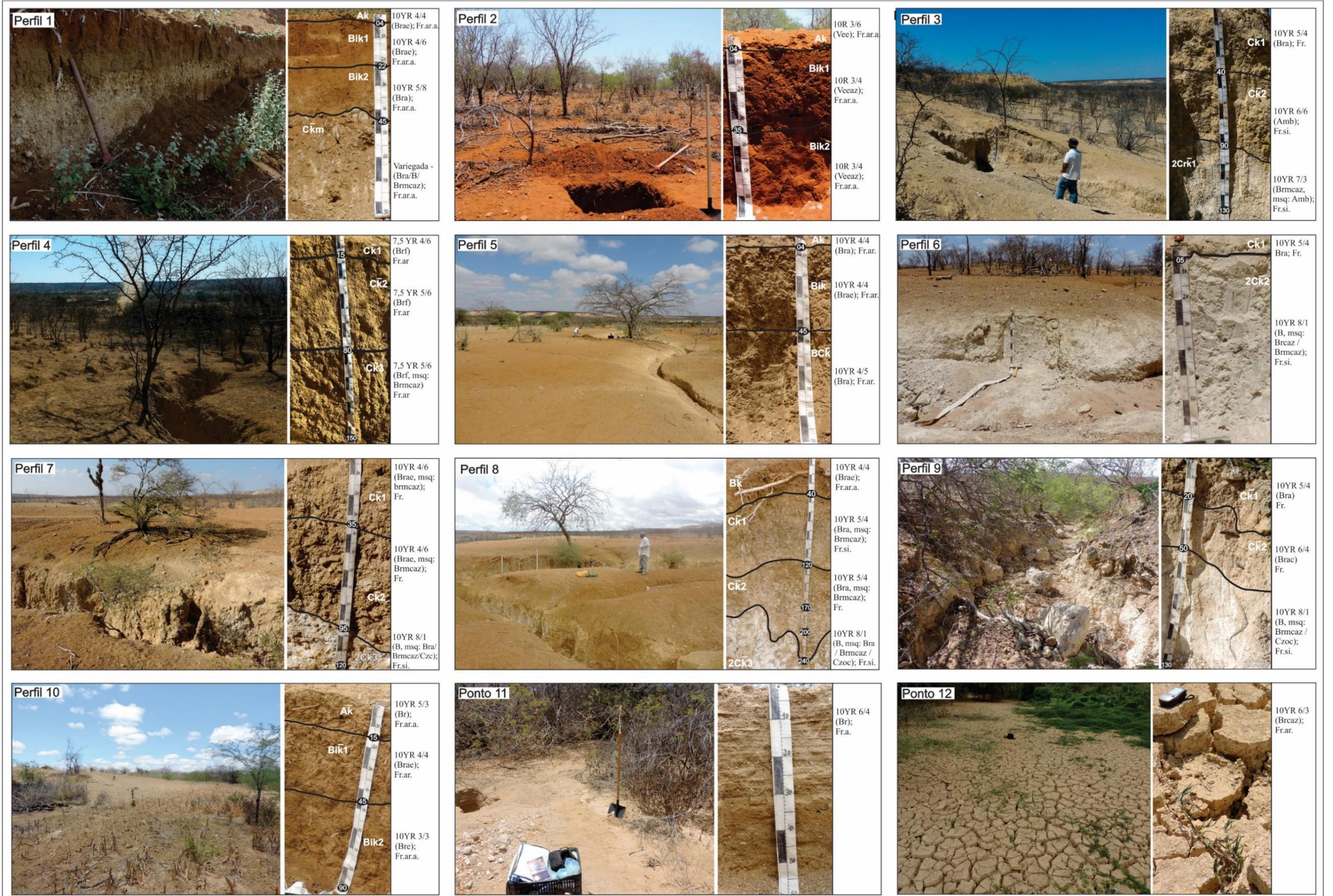
A principal diferença entre P1 e P2 é a cor. P1 possui coloração variando entre o bruno-amarelado e bruno-amarelado-escuro com matiz 10YR, e P2 possui matiz 10R, variando entre o vermelho-escuro e o vermelho-escuro-acinzentado. A cor apresentada no P2 sugere acumulação de óxidos de ferro, com participação de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na composição (SCHWERTMANN, 1993; MIKO et al., 1999; RESENDE et al., 2007; KAMPF et al., 2012).

Tabela 2 - Análises físicas dos perfis de solo de uma topossequência estudada na localidade de Taboa - Semiárido do estado da Bahia.

Horizonte		Frações da Amostra Total		Composição Granulométrica – Terra Fina					ADA	GF	Silte/ Argila	
Simb.	Prof.	Cal./Cas.	TF	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila				
-- cm --		----- g kg <sup>-1</sup> -----									----- %-----	
<b>P1 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico</b>												
Ak	0-4	36	964	444	77	521	199	280	252	10	0,71	
Bik1	4-22	22	978	437	127	562	135	303	259	15	0,44	
Bik2	22-42	67	933	422	125	547	144	309	243	21	0,46	
C $\bar{k}$ m	42-85 <sup>+</sup>	752	248	365	114	480	255	265	205	23	0,97	
<b>P2 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico leptofragmentário</b>												
Ak	0-4	60	940	410	168	578	177	245	209	14	0,72	
Bik1	4-35	44	956	361	169	530	146	324	215	34	0,45	
Bik2	35-65	69	931	352	163	515	137	348	212	39	0,39	
<b>P3 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-40	109	891	265	111	377	379	244	28	89	1,55	
C $\bar{k}$ 2	40-90	298	702	150	77	227	528	244	13	95	2,16	
2Cr $\bar{k}$ 1	90-135 <sup>+</sup>	315	685	65	47	111	673	216	13	94	3,12	
<b>P4 – NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico típico</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-15	116	884	259	156	414	281	305	23	92	0,92	
C $\bar{k}$ 2	15-75	118	882	245	112	357	313	329	15	95	0,95	
C $\bar{k}$ 3	75-155 <sup>+</sup>	235	765	252	109	360	341	298	15	95	1,14	
<b>P5 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico</b>												
Ak	0-4	35	965	217	159	376	263	361	70	81	0,73	
Bi $\bar{k}$	4-45	102	898	234	127	362	253	386	34	91	0,65	
BCK $\bar{k}$	45-90 <sup>+</sup>	217	783	252	131	383	277	340	20	94	0,82	
<b>P6 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-5	201	799	171	120	291	449	260	14	95	1,72	
2C $\bar{k}$ 2	5-80 <sup>+</sup>	159	841	99	104	203	692	105	52	50	6,59	
<b>P7 – NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico típico</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-40	297	703	208	144	352	394	254	9	96	1,55	
C $\bar{k}$ 2	40-95	620	380	365	123	488	283	229	8	96	1,23	
2C $\bar{k}$ 3	95-130 <sup>+</sup>	405	595	77	125	202	654	144	13	91	4,55	
<b>P8 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico</b>												
Bi $\bar{k}$	0-40	120	880	236	218	454	207	339	73	79	0,61	
C $\bar{k}$ 1	40-120	240	760	137	163	300	351	349	39	89	1,00	
C $\bar{k}$ 2	120-200	278	722	159	146	305	452	244	12	95	1,86	
2C $\bar{k}$ 3	200-270 <sup>+</sup>	234	766	100	245	345	548	106	12	89	5,16	
<b>P9 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-25	218	782	270	171	441	333	226	95	58	1,48	
C $\bar{k}$ 2	25-60	201	799	195	160	355	436	210	42	80	2,08	
2C $\bar{k}$ 3	60-125 <sup>+</sup>	131	869	172	156	328	540	132	21	84	4,08	
<b>P10 – CAMBISSOLO FLÚVICO Carbonático vertissólico</b>												
A $\bar{k}$	0-15	210	790	322	224	546	217	237	73	69	0,92	
Bi $\bar{k}$ 1	15-45	118	882	155	160	315	351	334	92	72	1,05	
Bik2	45-95 <sup>+</sup>	78	922	247	266	513	153	334	80	76	0,46	
<b>Ponto 11 – P11 (amostra da camada superior)</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-25 <sup>+</sup>	312	688	453	204	657	208	135	24	83	1,54	
<b>Ponto 12 – P12 (amostra da camada superior)</b>												
C $\bar{k}$ 1	0-15 <sup>+</sup>	141	859	1	8	9	690	301	16	94	2,29	

Cal./Cas= Calhau e Cascalho; TF= Terra Fina; ADA= Argila Dispersa em Água; GF= Grau de Flocculação.

Figura 17 - Fotos dos perfis estudados (morfologia e paisagem associada) com divisão de horizontes e informações sobre cor e classe textural.



Amb= Amarelo-brunado; B= Branco; Br= Bruno; Bra= Bruno-amarelado; Brae= Bruno-amarelado-claro; Brae= Bruno-amarelado-escuro; Brcaz= Bruno-claro-acinzentado; Bre= Bruno-escuro; Brf= Bruno-forte; Brmcaz= Bruno muito claro-acinzentado; Cze= Cinzento-claro; msq= Mosqueado; Vee = Vermelho-escuro; Veeaz =Vermelho-escuro-acinzentado. Fr.= Franco; Fr.a.= Francoarenosa; Fr.ar.a.=Franco-argiloarenosa; Fr.ar.= Francoargilosa; Fr.si.= Francosiltosa.

Solos vermelhos em áreas carbonáticas são desenvolvidos em condições influenciadas pelo pH mais elevado (notadamente próximo do neutro), associados com uma drenagem interna mais acentuada, que favorecem a formação de óxidos de ferro (BOERO & SCHWERTMANN, 1989). Esses autores afirmam que a alta permeabilidade dos materiais é fundamental para que ocorra maior perda de água na massa do solo (desidratação) e viabilize maior formação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (hematita) em relação a  $\text{FeOOH}$  (goethita)<sup>9</sup>. Considerando sua textura, estrutura moderada em blocos subangulares e granulares, pedoforma plana, e presença de rochas fragmentadas relativamente ricas em quartzo na base do perfil, o P2 apresenta a drenagem interna mais livre e necessária à formação de solos vermelhos.

Ao contrário, em P1 a coloração bruno-amarelada sugere condições mais restritivas de drenagem. Neste perfil foi verificada presença de horizonte  $\text{C}\bar{\text{km}}$  a 42 cm representado por material extremamente cimentado (sufixo m), contínuo por dezenas de metros em toda base do *solum* (FIGURA 17), que restringe a drenagem do perfil, mesmo sobre topografia plana. Esta coloração reflete ambiente com maior disponibilidade de água, propício para a formação de goethita (KAMPF et al., 2012).

O horizonte  $\text{C}\bar{\text{km}}$  no P1 é formado por calhaus e matacões com formas bastante irregulares que não se desfazem após imersão em água. Esses fragmentos diminuem em direção a base, onde o horizonte torna-se menos fraturado. Os indícios de presença de carbonatos secundários são evidentes, com efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10%. Essas propriedades reiteram a presença de um horizonte petrocálcico, que representa a porção mais superficial dos calcretes da Formação Caatinga.

No horizonte Bik2, também do P1, acima do horizonte petrocálcico, foi verificada presença de pequenos pontos de material branco revestindo blocos subangulares e preenchendo macroporos (epiderme branca pulverulenta, que visivelmente desaparece quando umedecida), indicando eflorescências de carbonato de cálcio, com efervescência muito forte. Há também presença de pequenas concreções e nódulos carbonáticos (efervescência muito forte) com tamanho em torno de 3mm com forma predominantemente irregular. Essas feições serão mais detalhadamente descritas na caracterização micromorfológica.

---

<sup>9</sup> A formação de óxidos de ferro nos ambientes aeróbicos inicia-se com a liberação do  $\text{Fe}^{2+}$  dos minerais primários, pela intemperização e sua imediata oxidação... Na sequência os íons de  $\text{Fe}^{3+}$  precipitam-se como ferrihidrita ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) ou goethita ( $\text{FeOOH}$ )... A hematita é formada a partir de seu necessário precursor, a ferrihidrita, por uma reação no estado sólido, em que, por um processo de desidratação e rearranjo no interior de agregados individuais de ferrihidrita, ocorrem a nucleação e o crescimento de cristais individuais de hematita (Kampf et al., 2012, p. 108)

#### 4.1.2. Materiais no interior da depressão: solos desenvolvidos de colúvios e alúvios

No interior da depressão, ao longo da vertente, os horizontes A e B (*solum*) foram parcialmente retirados pela ação de agressivos processos erosivos nas encostas. A maioria dos perfis apresentados estão com o horizonte  $C\bar{k}$  exposto à superfície (perfis P3, P4, P6, P7 e P9). Apenas os perfis P5, P8 e P10 possuem sua morfologia preservada.

Ao longo da topossequência parte significativa dos solos apresenta horizonte pedogenético “ $\bar{k}$ ” (indicando acumulação de carbonato de cálcio secundário), descritos como:  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P3);  $C\bar{k}1$ ,  $C\bar{k}2$ ,  $C\bar{k}3$  (P4);  $Bi\bar{k}$ ,  $BC\bar{k}$  (P5);  $C\bar{k}1$  (P6);  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P7);  $Bi\bar{k}$ ;  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P8). São constituídos por materiais acomodados na forma de depósitos não estratificados e mal selecionados com variável conteúdo de cascalhos e calhaus não-carbonáticos e carbonáticos (alta pedregosidade), sugerindo depósitos colúviais.

As cores nos citados horizontes são brunadas, com matiz 10YR variando entre o bruno-amarelado e o bruno-amarelado escuro, exceto no P4 onde ocorre matiz 7,5 YR com a cor bruno-forte. A cor mais avermelhada do P4, associada com sua maior profundidade, são indícios de que no local ocorreu misturas que incluíram também a acumulação de materiais provenientes dos solos avermelhados da borda do platô.

A textura da terra fina nos horizontes –  $C\bar{k}1$  (P3);  $C\bar{k}1$ ,  $C\bar{k}2$ ,  $C\bar{k}3$  (P4);  $Ak$ ,  $Bi\bar{k}$ ,  $BC\bar{k}$  (P5);  $C\bar{k}1$  (P6);  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P7);  $Bi\bar{k}$ ;  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P8) – varia de franco, francoargilosa e francosiltosa, com teores granulométricos muito distintos ao longo da topossequência e dentro dos perfis. Há predominância de silte e areia, exceto no  $Bi\bar{k}$  (P5), que sugere, comparativamente, maior desenvolvimento pedogenéticos no interior do compartimento dfv.

Já a estrutura dos agregados é predominantemente moderada em blocos subangulares com consistência seca variando entre dura e muito dura, e friável após umedecimento. Há pequenos pontos de material branco pulverulento, com as mesmas características descritas no P1, indicando eflorescências de carbonato de cálcio, ocorrendo nos macroporos e sobre os agregados. Há também presença de pequenas concreções e nódulos carbonáticos (efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10%) em tamanhos variados (entre 1 e 15 mm) com forma predominantemente irregular. Estas informações são importantes e indicam que, assim como nos solos do platô, há na atualidade significativa precipitação de  $CaCO_3$ .

Os perfis P3, P4 e P5 são ligeiramente pedregosos (menos de 1% da massa do solo), enquanto o P6 é pedregoso (entre 3 e 15%), e o P7 e P8 são muito pedregosos (15 a 50%) (material não-carbonático). Os dois últimos perfis estão localizados na média encosta sobre superfície suave ondulada. De fato, a pedregosidade da massa do solo aumenta em direção ao

sopé da vertente, em posição altimetricamente inferior, associada a uma condição de menor declividade. Estes materiais de composição não-carbonática e com superfícies polidas, encontrados em meio aos materiais inconsolidados altamente carbonáticos, são semelhantes aos clastos observados nos conglomerados do platô, sendo essa sua fonte inferida. São calhaus e cascalhos angulosos, subangulosos e arredondados, apresentando-se também em forma de linha de cascalheira na base dos colúvios, ao longo da média vertente, com afloramento nas proximidades do P9, na transição da média para a baixa vertente (FIGURA 15), que serão contextualizados no Capítulo 6.

Também no ponto 11 (P11), que constituiu local de coleta de sedimentos na planície de inundação do rio Salitre, próximo à desembocadura de uma feição erosiva linear, foi observada significativa presença de calhaus e cascalhos arredondados não-carbonáticos em meio a sedimentos predominantemente carbonáticos, confirmando a influência de materiais provenientes da destruição de conglomerados na composição do material de origem dos solos ao longo de toda vertente no interior da dfv.

Na baixa encosta (P10), numa faixa irregular de poucas dezenas de metros, próxima ao leito do rio Salitre, os materiais possuem morfologia e atributos físicos distintos dos demais, constituindo coberturas aluvio-colúviais, formando um estreito terraço fluvial. Nos três horizontes analisados no P10, verificou-se irregular variação nos dados de textura e estrutura (Tabela 2), sendo que no Ak e Bik2 foram encontrados significativos valores de areia, 546 e 513 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Já no horizonte Bi $\bar{k}$ 1 o teor de areia (315 g kg<sup>-1</sup>) é reduzido para valores próximos dos encontrados em outros perfis no interior da depressão. Os valores de silte também estão oscilando dentro deste perfil, sendo os menores valores no Ak (217 g kg<sup>-1</sup>) e Bik2 (153 g kg<sup>-1</sup>) e o maior valor no Bi $\bar{k}$ 1 (351 g kg<sup>-1</sup>).

Nas amostras coletadas nos primeiros 25 cm na planície de inundação do rio Salitre (Ponto 11) foram encontrados valores de areia em torno de 657 g kg<sup>-1</sup> (TABELA 2), os maiores em toda topossequência. Neste local, há confluência de sistemas erosivos lineares com a planície de inundação, constituindo o primeiro local (no contexto atual) de descarga dos sedimentos provenientes das encostas, estabelecendo um importante depósito com estrutura em grãos simples e consistência solta. Já no ponto 12, localizado no talvegue (leito seco do rio), constatou-se apenas 9 g kg<sup>-1</sup> de areia, com 690 g kg<sup>-1</sup> de silte e 301 g kg<sup>-1</sup> de argila, constituindo local de decantação de partículas mais finas, que não foram retiradas pelo rio Salitre, devido a inexistência de fluxo de água fluvial. Neste local foram identificadas grandes estruturas laminares com fendas que ultrapassam 1 metro de profundidade e aberturas maiores que 5cm (FIGURA 17), sugerindo a presença de material com propriedades vérticas associadas à

presença de argilas 2:1, altamente expansivas. A consistência deste material é extremamente dura, firme e muito pegajosa.

#### **4.1.3 Materiais no interior da depressão: a descontinuidade de material de origem na base dos perfis**

Todos os afloramentos rochosos no interior da depressão foram apontados como carbonáticos, com forte efervescência após adição de HCl, constituindo materiais calcíticos variados, com aspectos ora nodulares, ora maciços e outros pulverulentos, além de tufos calcários. Um aspecto importante é que estes materiais se distinguem das rochas carbonáticas encontradas no platô, principalmente por serem mais friáveis e leves. Penha (1994) afirma que o calcrete da Formação Caatinga é pedogênico nos primeiros metros (podendo chegar a 15 m), e nas partes inferiores é geogênico ou freático, ultrapassando os 30 metros de profundidade. Já Auler (1999) defende uma origem palustre, onde calcários lacustrinos e pedogênicos formam-se ao mesmo tempo, influenciados pelas oscilações freáticas, compondo uma estratigrafia complexa. Independente do modelo, a estratigrafia dos substratos geológicos na área de estudo parece conter calcretes de origem pedogênica na porção superior do platô e abaixo dele uma diversidade de fácies associadas ao calcário freático, que incluem desde materiais não carbonáticos cimentados por carbonatos (da borda do platô e na alta encosta), como apresentado, até os calcários pulverulentos e tufos no interior da dfv.

Na base do P3 (horizonte  $2C\bar{r}k1$ ), posicionado na alta encosta, foi descrito como saprolito com estrutura em blocos angulares e subangulares com consistência muito dura a extremamente dura e firme, com predominância da coloração bruno muito claro-acinzentado mosqueado com branco. Esse saprolito são originados de materiais semelhantes àqueles observados na base do P2 (FIGURA 15).

Os horizontes da média vertente, descritos como  $2C\bar{k}2$  (P6),  $2C\bar{k}3$  (P7),  $2C\bar{k}3$  (P8),  $2C\bar{k}3$  (P9) são constituídos por materiais pulverulentos, altamente calcíticos, também associados à Formação Caatinga (FIGURA 15). Estes horizontes são mais esbranquiçados (valor/croma = 8/1), com mosqueados bruno muito claro-acinzentado, cinzento-claro e cinzento-oliváceo-claro. Estes aparecem em profundidades variadas ao longo das encostas, desde sua quase total exposição no P6 até 200 cm no P8. Próximo ao P6 ocorre na forma de nódulos brancos que se desfazem com facilidade. Este material foi descrito por Penha (1994) como horizonte nodular-gredoso, sendo ressaltado seu aspecto pulverulento.

A predominância do branco (base dos perfis de 6 a 9) é explicada, entre outros fatores, pela grande concentração de  $\text{CaCO}_3$  nestes materiais (RIBEIRO et al., 2012), e pelo reduzido teor de óxidos de ferro. A presença dos mosqueados com cores acinzentadas ou esverdeadas, com cromas  $\leq 2$ , podem representar saturação por água, com remoção dos óxidos de Fe após atividade de bactérias redutoras (SCHWERTMANN, 1993; KHAN e FENTON, 1994).

Há significativa distinção morfológica entre os materiais alóctones brunados e os materiais esbranquiçados na base dos perfis, como é visivelmente demonstrado no P7 da Figura 17, com limite/transição abrupta entre os horizontes, discordante com a declividade local. Em outros pontos da vertente, a transição torna-se ondulada e clara, ou até mesmo difusa, representando uma mescla de materiais da base do perfil e os colúvios sobrejacentes.

Nos perfis P3 a P9 (alta, média e início da baixa vertente) ocorre aumento de silte em profundidade, com teores que chegam a  $692 \text{ g kg}^{-1}$  no P6-2C $\bar{k}$ 2, por exemplo, demonstrando o baixo desenvolvimento pedogenético destes materiais.

## **4.2. Caracterização química e o $\text{CaCO}_3$ equivalente da cobertura pedológica na topossequência**

### **4.2.1 Atributos químicos**

A análise da Tabela 3 aponta que os solos na área apresentam valores de  $\Delta\text{pH}$  (pH KCl - pH  $\text{H}_2\text{O}$ ) negativos, indicando o predomínio de carga líquida negativa, coerente com solos carbonáticos estudados no Brasil, observados também por Oliveira et al. (1998), Lynch (2009), Girão et al. (2014), Ferreira et al. (2016), Maranhão et al. (2016), entre outros. Além disso, todas as amostras apresentam valores elevados de pH em água, entre 7,6 e 8,0 no platô (P2), situados na classe de reação moderadamente alcalinos, e acima de 8,1 até 9,0 nos outros perfis de solo, considerados fortemente alcalinos, de acordo com SiBCS (SANTOS et al., 2018). Nestas condições de pH há relativo desequilíbrio geoquímico na disponibilidade de elementos no solo, pois grande parte dos micronutrientes tem sua disponibilidade reduzida, a exemplo do boro, manganês, cobre e zinco (MOREIRA et al., 2000), além de ferro e cobalto (OLIVEIRA, 2008).

Do ponto de vista químico, uma das características mais marcantes em todos os perfis é a predominância do  $\text{Ca}^{2+}$  no complexo sortivo (acima de 70%), condizente com o contexto carbonático calcítico do material de origem, independente da sua natureza eluvial ou colúvio-aluvial. Além disso, foram registrados teores significativamente altos do referido íon, chegando a  $20,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  no Bi $\bar{k}$ (P5) (TABELA 3).

Tabela 3 – Atributos químicos dos solos de uma topossequência estudada na localidade de Taboa - Semiárido do estado da Bahia.

Hor.	pH			Complexo Sortivo								TArg	V	P	CCE	CO	MO
	H <sub>2</sub> O	KCl	ΔpH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	T						
----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----											%	mg kg <sup>-1</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----				
<b>P1 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico</b>																	
Ak	8,4	7,3	-1,1	16,8	1,8	0,72	0,24	19,56	0,1	0,70	20,3	72,5	96	1,3	98	8,6	15,0
Bik1	8,4	7,2	-1,1	18,0	1,1	0,11	0,14	19,35	0,1	0,68	20,0	66,1	97	1,1	99	3,0	5,1
Bik2	8,5	7,3	-1,2	17,0	0,9	0,03	0,38	18,27	0,1	0,65	18,9	61,2	97	0,6	114	1,8	3,2
Ck <sub>m</sub>	8,6	7,4	-1,3	15,7	0,8	0,03	0,38	16,93	0,1	0,64	17,6	66,4	96	0,3	273	0,3	0,5
<b>P2 – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico leptofragmentário</b>																	
Ak	8,0	7,5	-0,5	10,7	1,4	1,02	0,22	13,3	0,1	0,7	14,0	57,3	95	34,0	75	8,7	15,1
Bik1	7,6	6,3	-1,3	8,8	1,6	0,27	0,07	10,7	0,1	1,1	11,8	36,4	91	1,5	68	7,1	12,4
Bik2	7,6	6,1	-1,6	10,2	1,4	0,09	0,08	11,8	0,1	1,1	12,8	36,9	92	0,8	61	2,6	4,5
<b>P3 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,4	7,6	-0,8	11,2	0,9	0,06	0,36	12,6	0,1	0,7	13,2	54,1	95	1,0	598	7,2	12,6
Ck <sub>2</sub>	8,5	7,8	-0,8	6,1	0,7	0,03	0,60	7,4	0,1	0,6	8,1	33,0	92	1,7	820	0,8	1,4
2Crk <sub>1</sub>	8,2	7,9	-0,3	5,2	0,7	0,04	0,92	6,9	0,1	0,6	7,6	35,0	91	1,5	924	0,1	0,1
<b>P4 – NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,6	7,6	-1,0	11,2	1,2	0,10	0,35	12,8	0,1	0,6	13,4	44,1	95	1,0	532	6,6	11,5
Ck <sub>2</sub>	8,6	7,6	-1,0	10,4	1,1	0,04	0,38	11,9	0,1	0,6	12,6	38,2	95	0,6	580	2,0	3,6
Ck <sub>3</sub>	8,6	7,5	-1,1	9,5	1,0	0,06	0,39	11,0	0,1	0,6	11,6	39,0	95	1,7	688	2,2	3,8
<b>P5 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico</b>																	
Ak	8,5	7,3	-1,2	19,8	1,9	0,46	0,24	22,5	0,1	0,6	23,1	63,9	97	7,2	90	7,4	12,9
Bi <sub>k</sub>	8,6	7,3	-1,2	20,1	1,6	0,04	0,41	22,1	0,1	0,6	22,8	59,0	97	0,3	157	5,1	8,8
BC <sub>k</sub>	8,1	7,4	-0,7	19,0	1,6	0,03	0,41	21,0	0,1	0,6	21,6	63,6	97	0,3	234	3,2	5,5
<b>P6 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,4	7,4	-1,1	19,1	1,6	0,15	0,35	21,2	0,1	0,6	21,9	83,9	97	0,3	619	5,4	9,4
2Ck <sub>2</sub>	8,9	7,9	-1,0	9,0	0,7	0,04	0,41	10,1	0,1	0,5	10,7	101,6	95	0,3	986	0,8	1,5
<b>P7 – NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,7	7,5	-1,2	11,7	1,0	0,10	0,39	13,2	0,1	0,6	13,8	54,2	96	0,8	760	0,9	1,6
Ck <sub>2</sub>	8,6	7,6	-1,0	10,9	1,0	0,12	0,37	12,3	0,1	0,6	13,0	56,7	95	1,9	805	0,3	0,5
2Ck <sub>3</sub>	8,8	7,6	-1,2	17,5	1,8	0,13	0,40	19,8	0,1	0,6	20,4	142,0	97	0,4	871	0,1	0,1
<b>P8 – CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico</b>																	
Bi <sub>k</sub>	8,5	7,4	-1,1	17,0	1,4	0,15	0,40	19,0	0,1	0,6	19,6	57,8	97	0,3	198	5,3	9,3
Ck <sub>1</sub>	8,5	7,3	-1,2	19,9	1,2	0,05	0,45	21,6	0,1	0,6	22,3	63,8	97	0,3	670	3,6	6,3
Ck <sub>2</sub>	8,1	7,5	-0,5	15,0	1,1	0,09	0,48	16,7	0,1	0,6	17,3	71,2	97	1,0	812	1,1	1,9
2Ck <sub>3</sub>	8,2	7,8	-0,5	13,0	1,5	0,09	0,74	15,3	0,1	0,5	15,9	149,3	97	1,1	988	0,1	0,1
<b>P9 – NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,8	7,6	-1,2	13,5	0,7	0,11	0,36	14,6	0,1	0,6	15,3	67,7	96	0,4	717	8,5	14,8
Ck <sub>2</sub>	9,0	7,6	-1,4	13,2	0,8	0,24	0,06	14,3	0,1	0,6	14,9	71,1	96	0,3	705	6,4	11,1
2Ck <sub>3</sub>	9,0	7,8	-1,1	10,4	0,7	0,04	0,42	11,6	0,1	0,5	12,2	91,9	95	0,3	981	3,2	5,5
<b>P10 – CAMBISSOLO FLÚVICO Carbonático vertissólico</b>																	
A <sub>k</sub>	8,4	7,5	-0,9	12,6	1,4	0,37	0,36	14,8	0,1	0,6	15,4	64,9	96	0,6	222	7,9	13,7
Bi <sub>k1</sub>	8,7	7,4	-1,3	18,4	2,2	0,17	0,39	21,2	0,1	0,6	21,8	65,3	97	0,4	208	4,0	6,9
Bik2	8,6	7,3	-1,3	13,8	1,8	0,44	0,27	16,3	0,1	0,6	17,0	50,8	96	3,7	88	3,8	6,6
<b>Ponto 11 – P11 (amostra da camada superior)</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,7	7,7	-1,0	9,6	1,0	0,15	0,35	11,2	0,1	0,6	11,8	87,1	95	0,4	286	3,4	6,0
<b>Ponto 12 – P12 (amostra da camada superior)</b>																	
Ck <sub>1</sub>	8,2	7,5	-0,7	15,8	2,6	0,31	0,45	19,2	0,1	0,7	19,9	66,0	96	0,3	677	10,1	17,5

Hor. = Horizontes; S = Soma de Bases; T = Capacidade de Troca de Cátions - CTC Total; TArg = Atividade da Argila; V = Saturação por Bases; P = Fósforo Disponível; CCE = Carbonato de Cálcio Equivalente; CO = Carbono Orgânico; MO = Matéria Orgânica.

O fato de alguns horizontes da média vertente em superfície suave ondulada (P5, P6, P7 e P8) possuírem maior teor de  $\text{Ca}^{2+}$ , pode estar atrelado à influência do relevo na movimentação de solutos e materiais da alta encosta (P3 e P4) para a média encosta. Cabe também destacar a irregularidade na distribuição dos elementos em profundidade (em cada perfil), reiterando a natureza alóctone do material e a intensa dinâmica erosiva na vertente.

O íon cálcio em quantidade elevada possui implicações genéticas, pois favorece a floculação e reduz a dispersão das argilas, reduzindo ou impedindo o processo de lessivagem ou argiluviação, isto é, a translocação de argilas em suspensão, restringindo a formação de horizontes tipo Bt, por exemplo (SCHAETZL e ANDERSON, 2005). Exceto nos perfis P1 e P2 no platô, há na topossequência, de acordo com a Tabela 2, alto grau de floculação de argilas, tendo na maior parte das amostras analisadas valores acima de 80%, dado bastante comum em solos carbonáticos altamente calcíticos.

O excesso de cálcio também pode aumentar a precipitação de fósforo em decorrência da reação com o íon  $\text{Ca}^{2+}$ , implicando na diminuição da disponibilidade desse nutriente para as plantas (SAMPLE et al., 1980), além da possível inibição da absorção de alguns micronutrientes, como o cobre, por exemplo (MOREIRA et al., 2000).

Os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  apresentados na Tabela 3, apesar de bastante reduzidos em relação ao  $\text{Ca}^{+}$ , são significativos, entre 1 e 2  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , representando a segunda maior contribuição no complexo sortivo dos solos. Sua distribuição é irregular em alguns perfis no interior da dfv (P4, P8, P9 e P10), reforçando a natureza coluvial do material na vertente, onde possivelmente há grande influência de cascalhos não calcíticos encontrados na massa do solo, identificados na descrição morfológica em campo. Os valores encontrados corroboram com outros estudos desenvolvidos no semiárido baiano em solos carbonáticos das Formações Caatinga e Salitre (PEREIRA e FARIA, 1998; NAIME et al., 2007; CARLINE, 2013). Valores mais altos de  $\text{Mg}^{+}$  podem ser encontrados em solos carbonáticos desenvolvidos sobre litofáceis com significativa contribuição dolomítica, como no trabalho de Oliveira (2012) em rochas calcárias da Chapada do Apodi, no Ceará.

Os teores de  $\text{K}^{+}$  observados na Tabela 3 são de forma geral baixos, mas valores mais altos são encontrados nos perfis P1, P2, P5 e P10, especificamente nos horizontes Ak e Bik. Esse fato aponta para contribuição da matéria orgânica e/ou da influência de possíveis minerais micáceos ou K-feldspatos associados aos clastos de rochas não carbonáticas, ou ainda, no caso de P10, à contribuição de sedimentos aluviais (submetido a influência de materiais deslocados do alto curso do rio Salitre).

Os valores de soma de bases (valor S) e CTC (valor T) são semelhantes em toda topossequência, mostrando a pequena influência dos teores de  $H^+$  e  $Al^{3+}$ , que de fato apresentam valores muito baixos, condizente, de acordo com Curi e Kampf (2012), com um ambiente significativamente alcalino.

A soma de bases varia significativamente na topossequência. Os maiores valores são encontrados nos perfis P1, P5, P6, P7, P8 e P10, que estão sob baixa declividade ( $\leq 5\%$ ) desenvolvidos sobre materiais carbonáticos, exceto o P2, único que apresenta sinais de drenagem mais eficiente. Os perfis P3, P4 e P9, apesar de estarem sobre material de origem carbonático, estão em declividades  $\geq 10\%$ , e possuem horizontes com os menores valores SB. A partir disso, é possível apontar movimentação geoquímica de bases da alta para a média encosta. Como exemplo, pode-se citar o menor valor encontrado na topossequência (6,9  $cmol_c kg^{-1}$  no horizonte 2Crk1 do P3), associado ao perfil com maior declividade (acima de 30%), na alta encosta, sob condições bastante instáveis e com maior propensão a perdas geoquímicas. Por outro lado, valores acima de 20  $cmol_c kg^{-1}$  são encontrados à jusante, com declividade de 4% e maior propensão à acumulação de bases. É certamente um aspecto importante sobre a contribuição do relevo na dinâmica geoquímica da área.

A saturação por bases está sempre acima de 90% em toda topossequência, estando dentro do esperado para solos carbonáticos em climas semiáridos. Altos percentuais de saturação por bases corroboram com resultados de Lemos et al. (1997); Cunha e Ribeiro (1998); Oliveira et al. (1998); Pereira e Faria (1998); Naime et al. (2007); Oliveira (2012); Carline (2013); Girão et al. (2014); Ferreira et al. (2016).

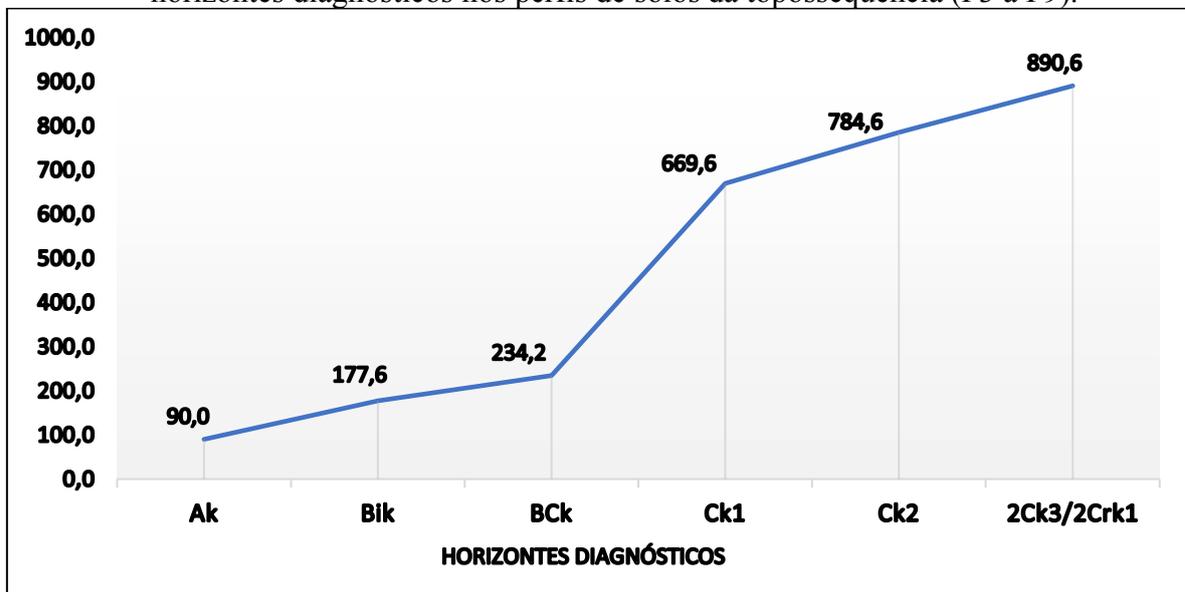
Com relação à atividade da argila, todos os valores encontrados na topossequência (TABELA 3) indicam atividade moderadamente alta da argila ( $T_{moa}$  – conteúdo entre 27 e 40  $cmol_c kg^{-1}$ ) e muito alta ( $T_{ma}$  – acima de 40  $cmol_c kg^{-1}$ ) de acordo com SiBCS (SANTOS et al., 2018).  $T_{moa}$  aplica-se para os horizontes subsuperficiais nos perfis P2, P3 e P4 no platô e alta encosta, e  $T_{ma}$  aplica-se para o P1 e os outros perfis na média e baixa encosta (P5 a P10). Estes valores, associados a presença de fendilamentos (registrados em campo), sugerem a ocorrência de argilas 2:1 altamente expansivas.

#### 4.2.2 $CaCO_3$ Equivalente (CCE)

Os solos analisados no platô e nas porções de vertente alta e média possuem  $CaCO_3$  equivalente (CCE) aumentando em profundidade (TABELA 3), confirmando a presença de materiais com composição rica em carbonatos secundários. Apenas os solos vermelhos que

recobrem rochas bastante fraturadas (P2) e estreitos depósitos colúvio-aluviais na margem do Salitre (P10) apresentaram valores mais baixos, mas ainda suficientes para caracterizar o caráter hipocarbonático. No primeiro caso, as melhores condições de drenagem devem promover a saída mais eficiente do cálcio, inibindo sua reprecipitação. Nos demais perfis os valores de CCE são muito altos, variando entre 580 e 988 g kg<sup>-1</sup> nos horizontes Ck̄; 234 g kg<sup>-1</sup> no BCk̄ (P5); entre 157 e 198 g kg<sup>-1</sup> nos horizontes Bīk̄; e 90 g kg<sup>-1</sup> no Ak (P5). O gráfico da Figura 18 apresenta a média do CaCO<sub>3</sub> equivalente dos horizontes diagnósticos identificados na alta e média encostas (P3 a P9), indicando que quanto mais próximo da base do perfil, maior o teor de CaCO<sub>3</sub>.

Figura 18 - Gráfico apresentado relação entre Carbonato de Cálcio Equivalente (g kg<sup>-1</sup>) e horizontes diagnósticos nos perfis de solos da topossequência (P3 a P9).



De forma geral, os valores máximos de CaCO<sub>3</sub> são significativamente altos se comparados com valores encontrados em outros trabalhos desenvolvidos no Brasil, como em Oliveira et al. (2018) que encontraram valores próximos a 250 g kg<sup>-1</sup> em horizontes B e C de Cambissolos no semiárido do Ceará, ou Paiva (2010) que apontou valores próximos de 500 g kg<sup>-1</sup> em horizonte B de Cambissolos no semiárido baiano. Ferreira (2013) encontrou horizonte Ck̄ com valores próximos de 850 g kg<sup>-1</sup>. Teores muito altos de carbonato de cálcio foram apontados por Bayat et al. (2018) em solos carbonáticos de clima árido no planalto central do Irã, com valores que chegam a 926 g kg<sup>-1</sup>, apontando que tal situação se explica a partir das condições ambientais com índice de chuva inferiores a 500 mm, que favoreceu o acúmulo de carbonato de cálcio. Shankar e Achyuthan (2007) estudando horizontes petrocálcicos numa

região semiárida no sul da Índia apontaram valores acima de  $640 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , chegando a  $952 \text{ g kg}^{-1}$ , indicando avançado estágio de calcificação.

Em função dos altos valores de CCE, exceto em P2 (solos vermelhos), toda a cobertura pedológica é caracterizada pela presença de horizontes cálcicos ( $\bar{k}$ ), isto é, com acumulação de carbonato de cálcio maiores que  $150 \text{ g kg}^{-1}$ , que é o limite mínimo indicado pelo SiBCS para definir um horizonte cálcico.

Morfologicamente, é possível identificar indícios do processo de calcificação nos materiais, principalmente nos horizontes  $\text{B}\bar{\text{C}}\bar{\text{k}}$ ,  $\text{C}\bar{\text{k}}1$ ,  $\text{C}\bar{\text{k}}2$  dos perfis P3 a P9. Como são horizontes de cor bruno-amarelada para mais escuro, fica mais fácil verificar a presença de produto precipitado difuso na matriz do solo, de cor branca, em forma de pseudomicélios sobre estruturas subangulares e poros, gerados por eflorescências de carbonatos, além de pequenas concreções e nódulos carbonáticos (pontos brancos distribuídas na matriz do solo). Esses aspectos morfológicos foram citados, entre outros autores, por Gile et al. (1966); Ranzani e Lujan (1974); Khresat (2001); Oliveira (2008) como expressão da precipitação de carbonatos. Shankar e Achyuthan (2007) afirmam que a ocorrência de cristais calcíticos finos, dispostos como revestimentos, pode ser o estágio inicial da formação de nódulos por acumulação de calcítica pedogênica.

É importante afirmar que os elevados níveis de alcalinidade das amostras apresentados na Tabela 3 (pH variando entre 8,2 e 9,0) associados aos atuais índices pluviométricos inferiores a 500mm e altas taxas de evapotranspiração, além dos baixos teores de carbono orgânico (que dificulta o aumento da pressão parcial de  $\text{CO}_2$ ), potencializam de fato, a calcificação e acumulação de  $\text{CaCO}_3$  secundário. Este processo de acumulação de  $\text{CaCO}_3$  frente às condições ambientais citadas, corrobora com Bachman e Machette (1977); Milnes (1992); Yaalon (1997); Schaetzl e Anderson (2005); Mello e Perez (2009); Kampf e Curi (2012); Brady e Well (2013); Silva (2013); Bayat *et al.* (2018) entre outros.

Os resultados reforçam que o horizonte endurecido em P1 pode ser enquadrado como petrocálcico ( $\text{C}\bar{\text{k}}\text{m}$ ), com valores de CCE de  $273 \text{ g kg}^{-1}$ . Os menores valores de  $\text{CaCO}_3$  nos horizontes superficiais desde mesmo perfil, Ak e Bik (inferiores a  $115 \text{ g kg}^{-1}$ ), podem estar relacionados à maior retenção da umidade associada à reduzida drenagem do perfil pela presença do horizonte petrocálcico, fato também retratado por Bachman e Machette (1977); Khresat (2001); Wrigt (2007). Jacks e Sharma (1995) associaram a presença de maior umidade no solo (acima do horizonte petrocálcico) à redução do potencial para precipitação de carbonatos.

Ao longo da topossequência foi verificado que o processo de calcificação e seu reflexo na paisagem tem estreita relação com a morfologia e declividade do terreno, visto que são fatores de extrema importância no movimento dos fluxos de água na superfície ou subsuperfície, de acordo com Bachman e Machette (1977). Os trechos da vertente que são mais planos seriam mais estáveis, apresentando menores taxas de erosão das camadas superficiais, colaborando na translocação em maior profundidade dos carbonatos. A estabilidade da superfície é um fator importante na profundidade da acumulação do carbonato de cálcio (KHRESAT, 2001). A calcificação nos solos ocorre comumente em superfícies geomórficas estáveis com inclinações suaves e concordantes com a topografia (BIGARELA, 1996). Schaetzl e Anderson (2005) defendem que o escoamento em declives mais íngremes nas porções superiores da encosta leva a condições pedogênicas mais secas, enquanto os locais na base das encostas tendem a ser mais úmidos. Os pedoambientes mais secos favorecem à calcificação numa posição mais superficial no perfil. Dessa forma, a espessura e a profundidade do horizonte cálcico podem ser maiores na porção média e inferior da encosta com baixa declividade, enquanto em superfícies íngremes na parte média e/ou superior da vertente, o horizonte cálcico será menos espesso e situado em menor profundidade (JACKS E SHARMA, 1995).

#### 4.3. Classificação dos solos da vertente

Dos dez perfis analisados ao longo da topossequência, apenas quatro possuem horizonte A (P1 e P2 no platô, P5 na meia encosta e P10 no terço inferior da encosta), se posicionando adequadamente nos critérios de classificação de acordo com o SiBCS (SANTOS et al., 2018). Os outros foram decapeados pelo processo erosivo na área, apresentado, na maioria dos casos, exposição direta do horizonte C. A classificação dos solos até quarto nível categórico é apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Quadro síntese da classificação dos perfis de solo da topossequência e condições no ambiente.

Perfil	Classificação	Condição do perfil
P1	CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico	Perfil completo
P2	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico leptofragmentário	Perfil completo
P3	NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico	Perfil decapeado
P4	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	Perfil decapeado
P5	CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico	Perfil completo
P6	NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico	Perfil decapeado
P7	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	Perfil decapeado
P8	CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico	Perfil decapeado
P9	NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico	Perfil decapeado
P10	CAMBISSOLO FLÚVICO Carbonático vertissólico	Perfil completo

P1 foi classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico em decorrência do horizonte petrocálcico ( $C\bar{k}m$ ) embasando os materiais bruno-amarelados que constituem o horizonte Bi. Embora o horizonte  $C\bar{k}m$  esteja fraturado, o caráter leptofragmentário não foi atribuído porque o contato ocorre a uma profundidade menor que 50 cm.

P2 também possui horizonte B incipiente (Bi) e apesar de representar o horizonte pedogenético mais intemperizado de toda a topossequência, considerando a baixa relação silte/argila (entre 0,39 e 0,45) e CTC inferior a 17  $cmol_c/kg$ , outros critérios como a alta saturação por bases (que está acima de 90%), a atividade da argila moderadamente alta – Tmoa (36,4  $cmol_c/kg$ ), o  $\Delta pH$  negativo, baixo grau de floculação (34%), afastam a possibilidade de enquadramento como horizonte B latossólico. Por isso foi classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico leptofragmentário. O contato com a rocha fragmentada entre 50 e 100 cm caracteriza o caráter leptofragmentário. Cambissolos Ta eutróficos já foram reconhecidos em outros estudos na bacia do rio Salitre e entorno (CUNHA e RIBEIRO, 1998; NAIME et al., 2007; PAIVA, 2010; CARLINI, 2013), em topografia plana ou suave ondulada.

P5, na média encosta do compartimento dfv, foi classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico. A condição carbonática foi apontada pela existência de horizontes cálcicos no perfil, com os horizontes  $Bi\bar{k}$  e  $BC\bar{k}$ , com respectivamente 157 e 234  $g\ kg^{-1}$  de  $CaCO_3$  equivalente (TABELA 3). O caráter saprolítico foi estabelecido a partir da presença do material brando constituindo o horizonte Cr na base do perfil.

Pelas características morfológicas, físicas e químicas, P8 também pode ser enquadrado na mesma classe de P5, o que mostra a dominância dos Cambissolos carbonáticos em toda média encosta sob topografia com declividade inferior a 8%, exceto nos locais onde as feições erosivas atuaram com maior agressividade gerando interrupções na distribuição lateral do horizonte  $Bi\bar{k}$ , levando a sua remoção.

O Perfil 10, apesar de apresentar horizonte Bi, possui particularidades atreladas ao caráter flúvico, verificadas a partir de oscilações texturais e químicas entre os três horizontes analisados. Além disso, foram observados fendilhamentos geradas pela expansão e contração das argilas no horizonte  $Bi\bar{k}1$ , o suficiente para discriminar o caráter vértico. Portanto, este perfil foi classificado como CAMBISSOLO FLÚVICO Carbonático vertissólico.

Os perfis P3, P6 e P9, estão em estágio muito avançado de erosão, apresentando exposição dos calcretes pulverulentos (materiais esbranquiçados). Estes perfis, apesar das limitações quanto a classificação, foram classificados como NEOSSOLOS LITÓLICOS Carbonáticos típicos. Os perfis P4 e P7 também não possuem *solum*, mas apresentam camadas de colúvios

compondo os horizontes C com espessura superior a 50 cm acima dos calcretes pulverulentos, e por isso foram enquadrados como NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico típico.

#### 4.4. Caracterização micromorfológica

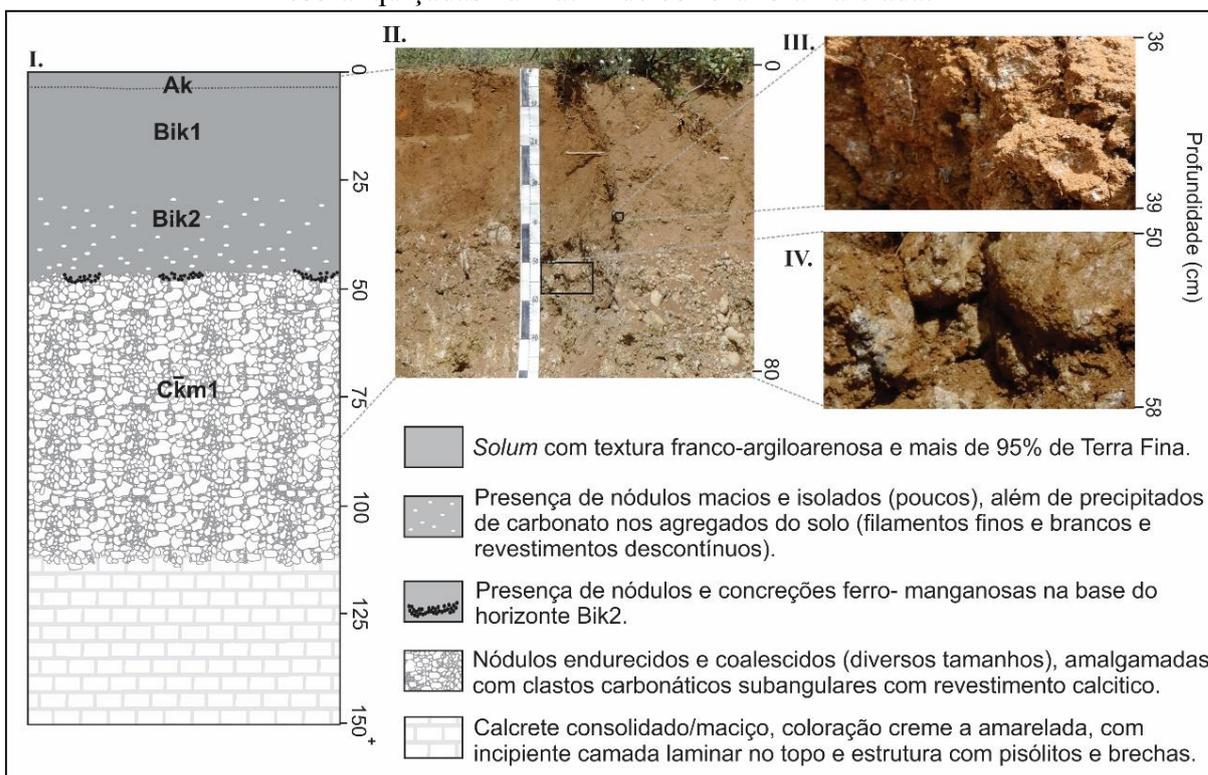
De acordo com a topossequência, buscou-se analisar as organizações micromorfológicas dos solos nos compartimentos platô carbonático e depressão de fundo de vale. Serão destacadas aqui as feições pedológicas por constituírem expressão fiel dos processos pedogenéticos atuais ou passados. A descrição micromorfológica completa pode ser visualizada no Apêndice C. No platô foram descritos horizontes BiK2 e C $\bar{k}$ m1 do P1 e BiK2 do P2, e na dfv horizontes C $\bar{k}$ 1, C $\bar{k}$ 2 e 2C $\bar{k}$ 1 do P3 e C $\bar{k}$ 1 do P4, na alta vertente, os horizontes C $\bar{k}$ 1, C $\bar{k}$ 2 e 2C $\bar{k}$ 3 do P8 na média vertente e os horizontes C $\bar{k}$ 1, C $\bar{k}$ 2 e 2C $\bar{k}$ 3 do P9 e o horizonte Bi $\bar{k}$ 1 do P10 na transição entre a média e baixa vertente e terraço fluvial. Associada à caracterização micromorfológica, em alguns casos é apresentada uma representação macromorfológica dos perfis e feições discutidas em lâminas visando facilitar sua identificação e compreensão.

##### 4.4.1. Solos no platô carbonático

No P1 as pedofeições de maior destaque são os revestimentos e preenchimentos carbonáticos e os nódulos lito e pedoreliquiais. Os preenchimentos e revestimentos ocorrem macroscopicamente no *solum* como indício de processo de calcificação ativa (FIGURA 19 – I, II e III), concordante com o que foi observado por diversos autores, como Gile et al. (1966); Ranzani e Lujan (1974); Khresat (2001); Alonso et al. (2004) e Oliveira (2008). Do ponto de vista micromorfológico, constitui precipitação de calcita micrítica, envolvendo preenchimentos densos e descontínuos (*infillings*) de poros, principalmente em câmaras e canais (FIGURA 20 – Fotos A e B), e revestimentos (*coatings*) também de poros (FIGURA 20 – Fotos C e D).

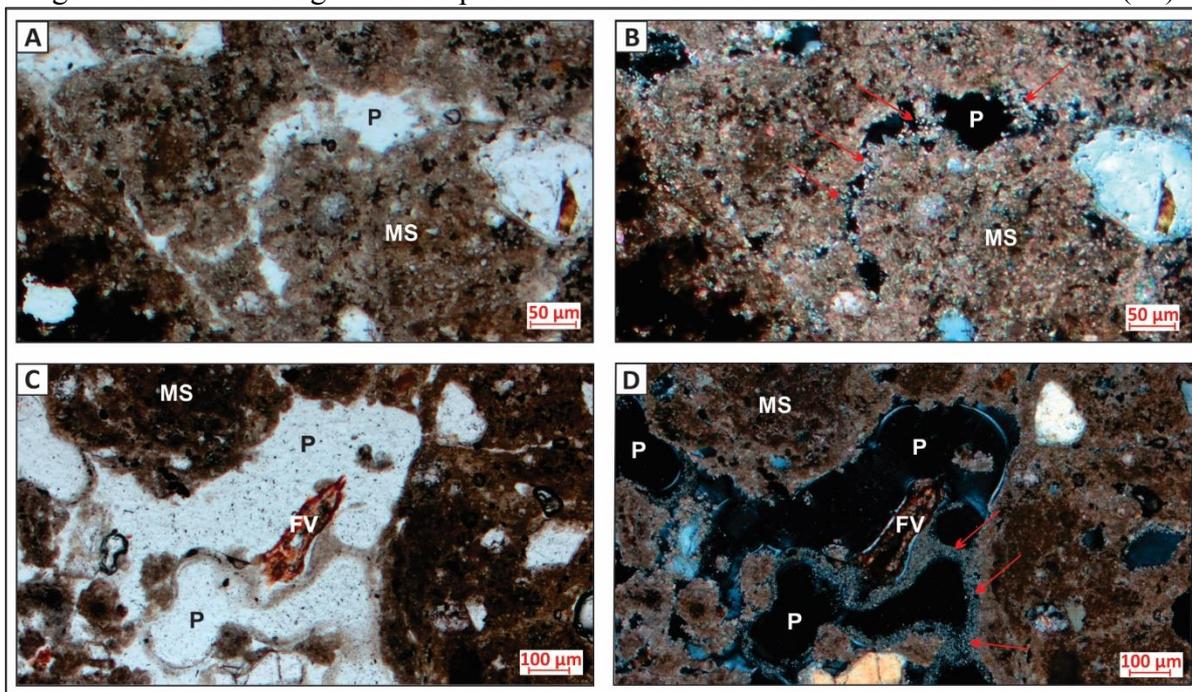
Shankar e Achyuthan (2007) afirmam que cristais calcíticos finos como revestimentos pode ser o estágio inicial da acumulação pedogênica, ou, como afirma Zucca et al. (2017), do processo de calcificação. Durand et al. (2010) afirma que os preenchimentos de carbonato são frequentes em solos de áreas mais ou menos áridas, e que revestimentos podem ser formados em intervalos de poucas semanas (ZAMANIAN et al., 2016), corroborando com a ideia de que foram gerados nas atuais condições climáticas que levam à calcificação, principalmente diante das características mais secas, instaladas no centro norte da Bahia desde o final do Pleistoceno e início do Holoceno (AULER et al., 2004; WANG et al., 2004b; WENDT, 2015) ou no Holoceno Médio (DE OLIVEIRA et al., 1999).

Figura 19 - Representação esquemática e foto do P1, evidenciando as pontuações esbranquiçadas na matriz de cor bruno-amarelada.



I – Perfil esquemático (solos sobre calcrete); II – foto do perfil em campo; III – foto destacando eflorescências de carbonato e nódulos carbonáticos macios (poucos) na massa do solo (Bik2); IV – foto dos nódulos endurecidos e clastos carbonáticos (Ckm1). Perfil localizado no platô com 1% de declividade.

Figura 20 - Fotomicrografias dos preenchimentos e revestimentos do horizonte Bik2 (P1).



Fotos A e C = destaque para preenchimentos através da precipitação de calcitas micríticas, visualizadas sob luz polarizada plana (PPL); Fotos B e D = destaque para revestimentos através da precipitação de calcitas micríticas, visualizadas sob luz polarizada cruzada (XPL). P = Poros; MS = Micromassa do Solo; FV = Fragmento Vegetal. Setas vermelhas = pedofeições carbonáticas.

Estas feições morfológicas não representam apenas critérios descritivos, mas poderiam ser vistas como o 1º estágio do desenvolvimento de horizontes cálcicos (GILE et al., 1966; MACHETTE, 1985) e da formação de calcretes pedogênicos (ALONSO-ZARZA et al., 1998; SCHAETZL e ANDERSON, 2005). Quando se entende que para o processo de calcificação é necessário, além do pH alcalino em condições secas, a existência de baixas pressões parciais de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) na atmosfera do solo (ROBBINS, 1985; OLIVEIRA, 2008; KAMPF e CURI, 2012; ZAMANIAN et al. 2016), fica evidente que os valores de pH acima de 8,4 (fortemente alcalino) combinado com os baixos teores de matéria orgânica (próximos a 3 g kg<sup>-1</sup> no P1-Bik2, e quase 5 vezes inferior ao teor indicado no horizonte A - Tabela 3), encontrados nos solos locais, constituem condições propícias para a precipitação de CaCO<sub>3</sub>, principalmente em um ambiente geologicamente carbonático com grande disponibilidade de íons de cálcio e com amplo déficit hídrico. Daí a baixa pressão parcial de CO<sub>2</sub> (influenciado pela profundidade/redução da porosidade e pela significativa diminuição no teor de matéria orgânica) constitui fator decisivo na precipitação de carbonato no horizonte B.

Além dos precipitados finos de calcita, ocorrem nódulos como feições pedológicas de destaque. Os nódulos de cor branca têm composição carbonática e ocorrem em quantidade variando entre “pouco” a “muito pouco” (menos de 15% da massa do solo) de acordo com Santos et al. (2013). São feições duras, com formas subangulares com tamanhos que variam entre 1 e 5 mm. Embora, macroscopicamente, esses nódulos possam sugerir uma segunda fase do desenvolvimento de um perfil calcrete, a observação em lâmina revela tratar-se de nódulos litorreliquiais, associados a fragmentos ainda não degradados do horizonte petrocálcico sotoposto, com a mesma fábrica interna destes.

Na base do *solum*, também são encontrados concreções e nódulos de cor preta a marrom avermelhada com diâmetro variando entre 1 e 3 mm e forma irregular e principalmente esférica. Sua composição é, possivelmente, ferro-manganosa (em alguns ocorre efervescência forte com peróxido de hidrogênio - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), possuindo aspecto muito parecido com os descritos por Oliveira et al. (2001) para solos formados sobre calcários no Norte de Minas Gerais, e, também semelhantes às concreções ricas em ferro e manganês descritas por Ferreira et al. (1992); Cunha et al. (2000), em solos carbonáticos da região de Irecê no semiárido baiano.

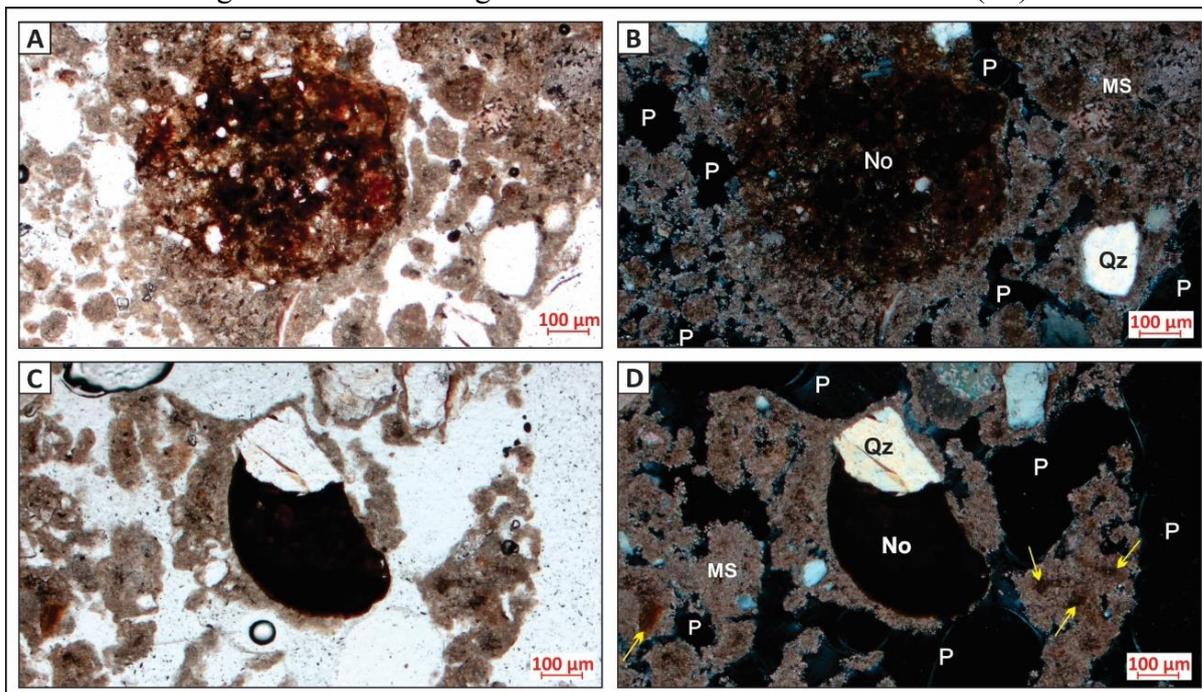
Os nódulos se apresentam com duas morfologias: nódulos órticos difusos<sup>10</sup>, são concentrações impregnadas de oxi-hidróxidos de ferro, resultante de alterações no fundo matricial (FIGURA 21 – Fotos A e B). Internamente há grãos minerais semelhantes aos

---

<sup>10</sup> Semelhantes aos apresentados por Stoops (2021, p. 145).

encontrados na micromassa circundante (fração grossa preservada), além de poros. São chamadas por Stoops (2021) de pedofeições matriciais, indicando que várias características do fundo matricial permanecem visíveis. Impregnações de ferro na matriz em estágio inicial foram sinalizadas pela seta amarela na Figura 21, Foto D.

Figura 21 - Fotomicrografias dos nódulos do horizonte Bik2 (P1)



Nódulo órtico difuso moderadamente impregnado com oxi-hidróxidos de ferro, (A) em PPL, (B) em XPL. Nódulo disórtico com limites nítidos, fortemente impregnado com oxi-hidróxidos de ferro; as setas em amarelo apontam algumas zonas de impregnação de ferro, (C) em PPL, (D) em XPL.

Há também nódulos disórticos com limites nítidos, fortemente impregnado com oxi-hidróxido de ferro, acoplado à fragmento anguloso de quartzo (FIGURA 21 – Fotos C e D). Se por um lado a angulosidade do quartzo comprova que o nódulo não passou por grandes movimentos, a porosidade do entorno implicaria em algum tipo de deslocamento desta feição, daí se estabeleceu que seria um nódulo disórtico, isto é, formados *in situ*, mas sujeitos a translocações locais (STOOPS, 2021). Algumas manchas internas com menor impregnação são capazes de denunciar semelhanças com o fundo matricial, que possui alta frequência de nódulos órticos, como os apresentados anteriormente.

De acordo com Schwertmann e Fanning (1976); Khan e Fenton (1994); Oliveira et al. (1998); Oliveira et al. (2001); Lindbo et al. (2010); Silva et al. (2013), a presença dessas concreções ferro-manganosas sugere alterações na quantidade de água no solo (variação entre condições redutoras e oxidantes) para viabilizar movimentação, acumulação e precipitação dos íons de Fe e Mn. Carvalho Filho et al. (2011) afirmam que a presença de manganês em solos é

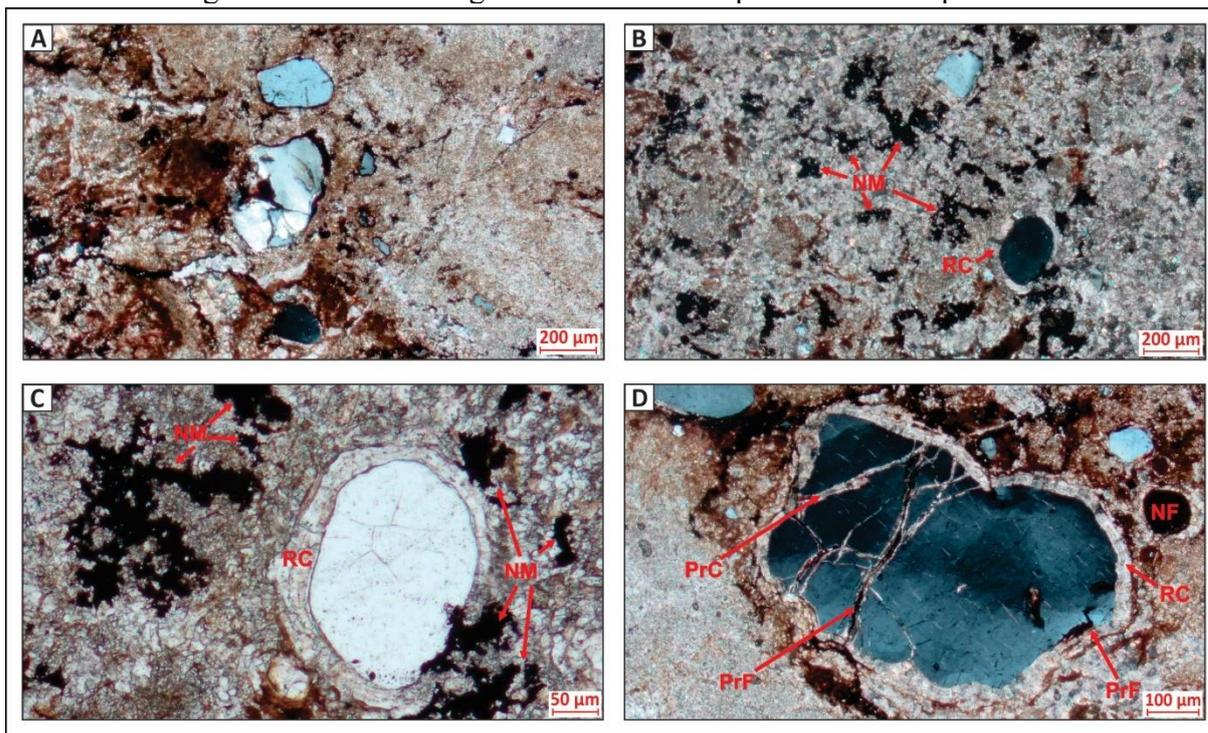
mais provável em ambientes com alternância de processos de oxidação e redução, os quais alteram a mobilidade e a precipitação do Mn. Jacks e Sharma (1995) utilizam a concentração elevada de manganês em horizontes cálcicos como indicador da presença de água subterrânea.

Tanto os nódulos acima descritos demonstram movimento de Fe no interior do fundo matricial, fenômeno associado a condições redoximórficas, possivelmente atrelada a oscilação de nível freático. Vale acrescentar que apesar do clima e da topografia (próximo a borda do platô) não favorecerem o encharcamento, é possível que este ocorra em períodos significativamente curtos (apenas durante as raras chuvas anuais), pois abaixo do estreito *solum* (40 cm) existe um horizonte petrocálcico, que reduz a permeabilidade.

O horizonte  $C\bar{k}m$ , isto é, o horizonte petrocálcico (FIGURA 19 - I, II e IV) possui continuidade na paisagem, visualizada a partir de escavação realizada para retirada de materiais (extração de terra) para terraplanagem em estrada vicinal a aproximadamente 100 metros oeste-leste, na coordenada UTM 310110 E / 8861950 N, Zona 24L. No perfil estudado, encontra-se fragmentado, constituindo um típico horizonte nodular. Os nódulos variam entre 1 e 30 cm (em quantidade dominante – acima de 85% do volume total dos materiais), possuem coloração marrom escuro, marrom amarelado e cinza escuro. É um horizonte semelhante ao que foi descrito por Penha (1994) na Fazenda Mucambo (Ourolândia-Ba, no alto curso da bacia do Salitre) como *hardpan* conglomerático-globular brechado.

Na análise micromorfológica deste horizonte, destaca-se uma microestrutura maciça, considerando que na lâmina não é possível discernir os nódulos carbonáticos que o compõem em macroescala, já que esses são maiores que a lâmina. Contudo, no seu interior ocorrem feições redoximórficas como zonas de acumulação e de depleção de ferro (FIGURA 22 – A e D), nódulos órticos detriticos de manganês (FIGURA 22 – B e C), zonas com preenchimento de material fino de composição ferruginosa (FIGURA 22 – D), como também feições de precipitação de carbonatos secundários, como revestimentos de  $CaCO_3$  (FIGURA 22 – B, C e D) e preenchimento calcítico (FIGURA 22 - C), ambos no entorno e interior das fraturas dos grãos de quartzo.

Figura 22 - Fotomicrografias do horizonte petrocálcico do perfil 1.



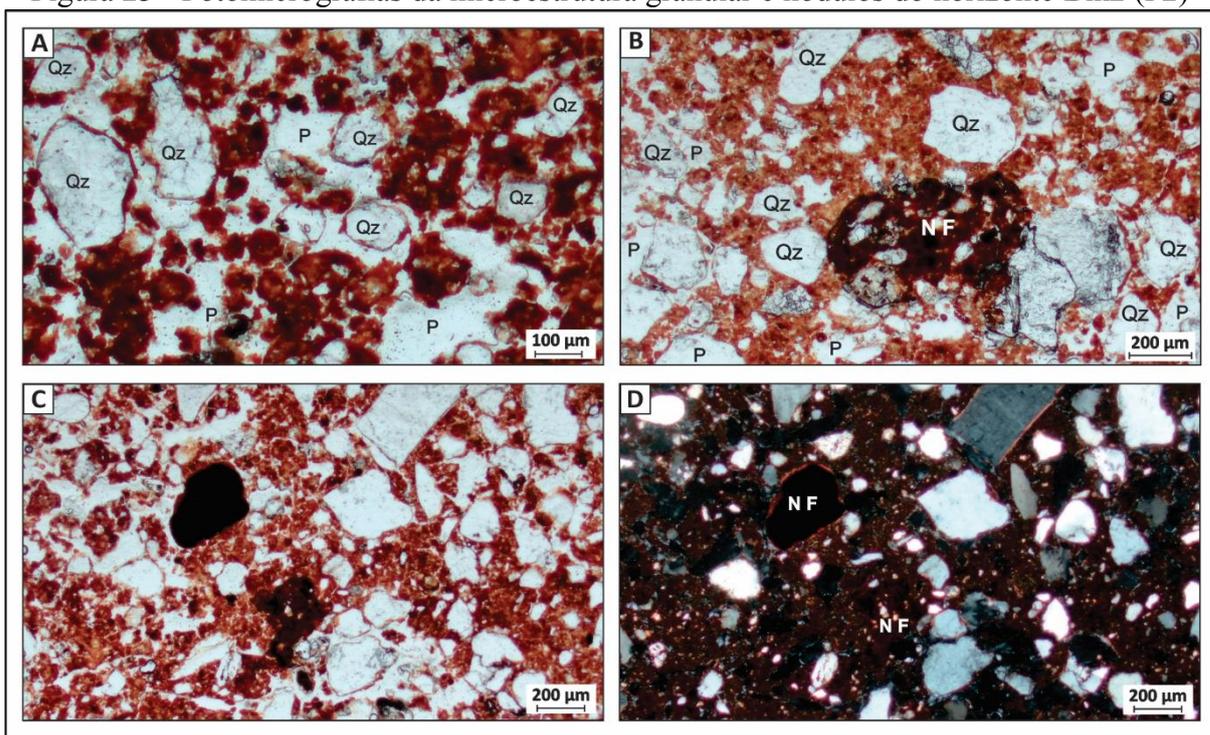
A = Foto em XPL, visando destacar zonas de acumulação de óxidos de ferro na porção centro-direita da foto, e zonas de depleção na porção esquerda. B = Foto em XPL destacando a presença de nódulos dendríticos de manganês (NM) e fragmento lítico reliquial com revestimento calcítico (RC). C = Foto em PPL, representa ampliação de recorte da foto B. D = Foto em XPL, apresentando fragmentos lítico reliquial bastante fraturado, com preenchimento calcítico (PrC) e por óxido de ferro (PrF), revestimento calcítico, além de presença de nódulo de ferro (NF).

A complexidade deste horizonte petrocálcico também se aplica na análise da porosidade, sendo registrado tanto macro, quanto micromorfológicamente, poros planares retos, constituídos por fissuras e gretas de contração (*Shrinkage*), geradas por crescimento de raízes e processos de umedecimento e secagem; além de poros em canais do tipo vugular, gerados pela dissolução de carbonatos, de acordo com Choquette e Pray (1970). Schaetzl e Anderson (2005) apontam que os principais fatores que impulsionam a dissolução do carbonato, por consequência a formação de porosidade vugular, incluem um ambiente de solo mais úmido, menores valores de pH, e maiores teores de CO<sub>2</sub> no solo. Assim, tais feições corroboram para o reconhecimento do horizonte C<sub>km</sub> como um produto da degradação de um calcrete maciço, provavelmente desencadeados em condições mais úmidas que as verificadas na atualidade. Isso reforça que nas condições atuais um antigo calcrete em processo de degradação pode estar se formando novamente, reiterando o caráter policíclico e multiepisódico desses materiais.

Também no platô foi descrito o horizonte Bik2 do P2. Trata-se do horizonte com microestrutura granular, com separação moderada, sendo que em alguns casos estas microestruturas se coalescem e formam uma 2<sup>a</sup> hierarquia de pedis, com blocos subangulares

fracamente separados (FIGURA 23). Sua porosidade é predominantemente de empilhamento, e na parte mais adensada há poros em canais, câmaras e fissuras. A distribuição relativa do fundo matricial é enáulica fina subangular rugosa, com espaçamento simples. O material grosso é predominantemente composto por quartzo subangular, mas também angulosos e arredondados, abundantes e mal selecionados. A micromassa possui coloração vermelha, limpidez pontilhada e salpicada, com fábrica birrefringente indiferenciada e granoestriada.

Figura 23 - Fotomicrografias da microestrutura granular e nódulos do horizonte Bik2 (P2)



A = Foto em PPL, com destaque microestrutura granular e revestimentos de argilas sobre grão quartzosos. B = Foto em PPL na presença comum de grãos quartzosos com tamanhos e formas bastante diversificados, além de nódulo órtico de ferro. Fotos C e D em PPL e XPL respectivamente, destacando nódulo anórtico de Ferro-manganês, logo abaixo, uma pedofeição de alta impregnação por ferro, podendo ser apontado como nódulo órtico com limite difuso (em formação). NF = Nódulo de Ferro; P = Poros; Qz = Quartzo.

Não foram observadas pedofeições carbonáticas no horizonte Bik2 do P2. Por outro lado, ocorrem revestimentos argilosos de composição oxídica (coloração vermelha) e nódulos ferruginosos.

Os revestimentos de argila constituem finos capeamentos ( $< 20 \mu\text{m}$ ) sobre grãos quartzosos subarredondados (principalmente), possuindo entre 0,1 e 1,0 mm de espessura (FIGURA 23-A). Esta feição sugere que em algum momento houve incipiente iluviação de argila e acúmulo na superfície dos grãos. De acordo com Schaetzl e Anderson (2005) a iluviação ocorre seguindo três estágios básicos: mobilização, transporte e deposição. Primeiro, a argila deve se dispersar do agregado e ser colocada em suspensão, para que a água percoladora possa

transportá-la, para finalmente ocorrer a deposição. Ferreira et al. (2016) reforça que quando a água do solo evapora ou é absorvida pelas plantas, as argilas ficam presas na superfície das unidades estruturais, grãos e paredes dos poros.

Apesar de não ser o mais comum, em solos com microestruturas granulares (geralmente com argilas de elevada flocculação), pode ocorrer iluviação de argilas de horizontes superiores para inferiores, certamente em menores distâncias (profundidades) e em menor frequência que em solos com argilas dispersas. Isso pode ocorrer sob condições de alta porosidade em momentos de chuvas forte afetando solos significativamente secos, para que algumas plaquetas de argila possam ser fisicamente extraídas do agregado e sequencialmente translocadas (SCHAETZL e ANDERSON, 2005). Esses mecanismos do processo de iluviação de argilas são favorecidos por um clima com sazonalidade bem-marcada por alternância entre o úmido e o seco (KUHN et al., 2010).

É importante destacar que mesmo existindo pequena iluviação de argilas, não há manifestação de qualquer horizonte argílico, equivalente aos citados por Dal' Bó et al. (2009); Bayat et al. (2018) em um contexto carbonático. Mas, considerando as atuais características climáticas, os revestimentos de argilas sobre grãos de quartzo podem apontar para condições ambientais pretéritas com pluviosidade mais frequente, e supostamente mais úmidas que a atualidade.

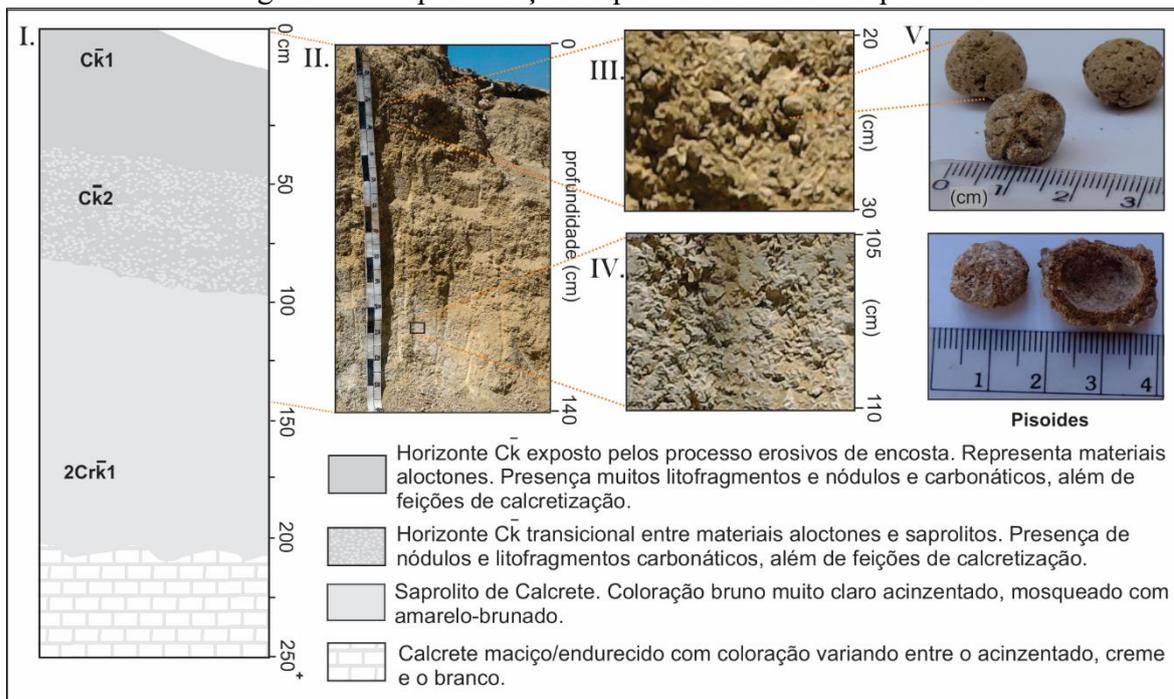
Os nódulos são compostos por ferro e envolvem grãos de quartzo, resultante de alterações no fundo matricial (FIGURA 23-B). A Figura 23-C e D apresenta fotos em PPL e XPL de um mesmo recorte na seção delgada, e entre os destaques está uma pedofeição com moderada impregnação por oxi-hidróxido de ferro, que pode ser classificado, de acordo com Stoops (2021), como nódulo órtico com limite difuso. Segundo descrições de Castro e Cooper (2019), esta feição pode ser chamada de “halo” de óxidos de ferro, caracterizados por impregnações do fundo matricial, contendo pontos internos com concentrações mais densas (pequenos nódulos), podendo ser indício de nódulos incipientes.

Como já destacado, o deslocamento do ferro e/ou manganês no fundo matricial ocorre em condições redutoras (pedoambientes saturado em água) e a posterior oxidação (ambiente seco) facilitam a precipitação na forma de nódulos. Como a matriz do solo indica boas condições de drenagem na atualidade, é provável que tais condições redutoras tenham se verificado no passado. A natureza incipiente dos nódulos pode demarcar o abandono da oscilação redox para uma condição oxidante mais estável, com drenagem mais livre. Como está situado na borda do platô, a abertura da dfv pode ter relação com o estabelecimento dessas condições.

#### 4.4.2. Solos na dfv (da alta à baixa vertente)

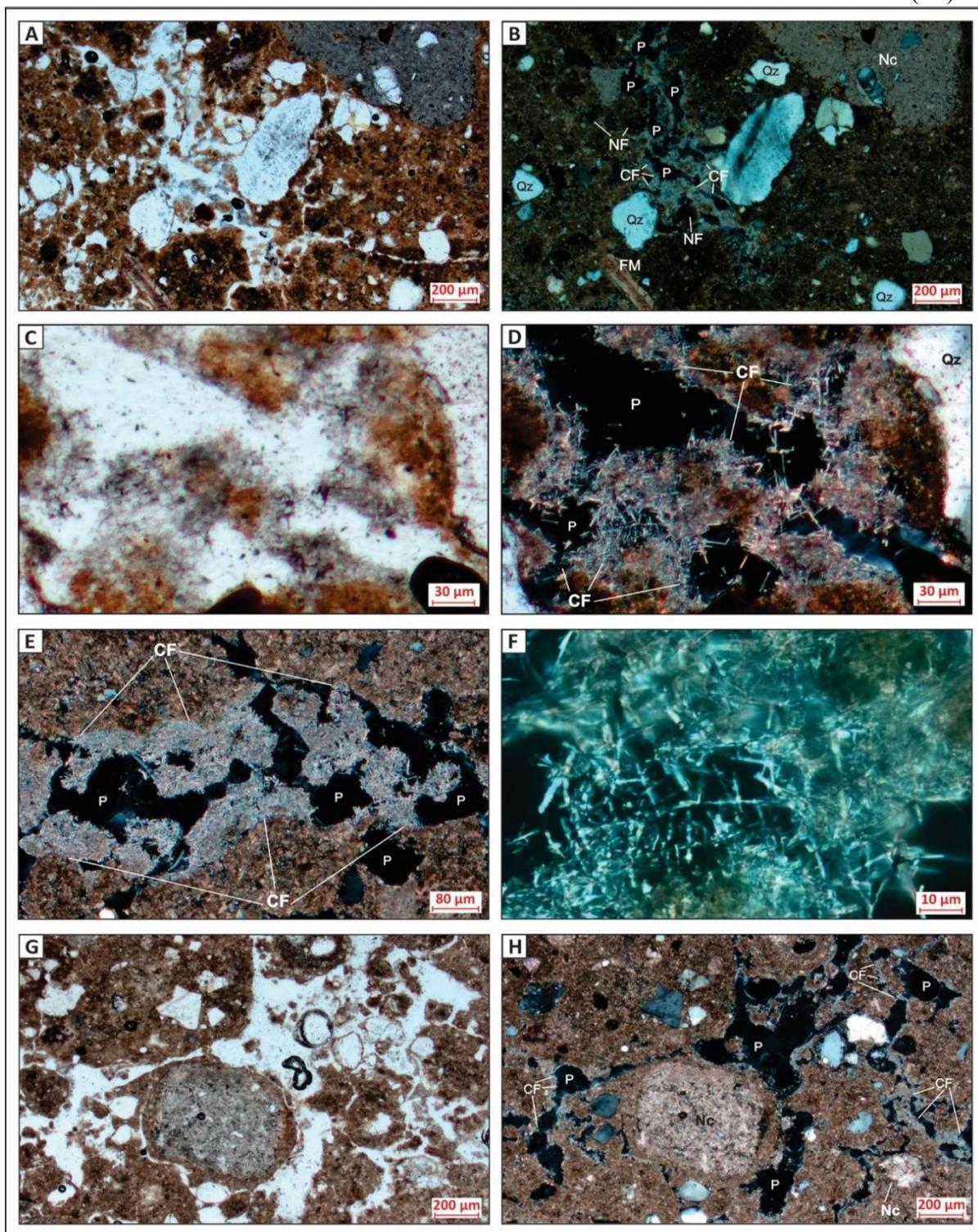
O P3 sintetiza as organizações da cobertura pedológica na alta vertente, isto é, com alta declividade, ausência de *solum*, horizontes cálcicos (originalmente subsuperficiais) constituídos por colúvios e por saprolitos de calcrites da Formação Caatinga (FIGURA 24).

Figura 24 - Representação esquemática e fotos do perfil P3



As principais pedofeições observadas foram preenchimentos e revestimentos carbonáticos, bem mais abundantes que os verificados no platô, mas também nódulos de composição variada. Sobre as pedofeições texturais, tanto no horizonte  $Ck_1$  quanto no  $Ck_2$ , ocorre calcita fibrosa-aciculada (*needle-fiber calcite*), constituindo cristais em forma de hastes ou microbastões individualizados e empilhados em diversas orientações, com comprimentos sempre inferiores a 100  $\mu m$  (mais comum abaixo de 20  $\mu m$ ), (FIGURA 25).

Figura 25 - Fotomicrografias dos revestimentos e preenchimentos de calcita fibrosa-aciculada, além de nódulos carbonáticos e de oxi-hidróxidos ferro nos horizontes  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  (P3).



A e B = destaque para muitos revestimentos em paredes de poros e preenchimentos com calcita fibrosa-aciculada (*needle-fiber calcite*) no horizonte  $C\bar{k}1$  (foto em PPL e XPL, respectivamente). C e D = Ampliação das fotos anteriores, apresentado revestimentos em paredes de poros e preenchimentos com calcita fibrosa-aciculada (foto em PPL e XPL, respectivamente). E = revestimentos em paredes de poros e preenchimentos com calcita fibrosa-aciculada no horizonte  $C\bar{k}2$  (foto em XPL). F = Ampliação da foto anterior na Objetiva de 50x, exibindo detalhe dos cristais aciculados (foto em XPL). G e H destacam nódulo órtico carbonático presente no horizonte  $C\bar{k}2$  (foto em PPL e XPL, respectivamente). CF = Calcita Fibrosa-Aciculada; FM = Fragmento Fóssil de Molusco; Nc = Nódulo Carbonático; NF = Nódulo de Ferro; P = Poros; Qz = Quartzo.

Durand et al. (2010) afirma que a calcita fibrosa-aciculada pode ser encontrada em solos de diferentes idades, mas é comum em solos do Holoceno como estágio inicial (estágio I ou II) da sequência morfológica apresentada no Quadro 3. Os autores afirmam que este tipo de cristalização é susceptível a transformações mineralógicas e morfológicas geradas por processos diagenéticos, podendo evoluir para plaquetas micríticas e microesparíticas recristalizadas.

Para Verrecchia e Verrecchia (1994) os cristais aciculares são bastante comuns em solos carbonáticos e calcretes e sua origem é geralmente atribuída a processos biogênicos (biomineralização) e/ou precipitações físico-químicas, a depender de sua morfologia. No primeiro caso, acredita-se que a precipitação de agulhas esteja relacionada à presença de material orgânico (raízes, pelos radiculares, fungos, bactérias) criando microambientes saturados com  $\text{CaCO}_3$ , ocorrendo também no interior de microrganismos que preservam os cristais após sua morte, mas principalmente a partir de hifas fúngicas específicas que liberam as hastes para o meio. No segundo caso, está associado a um contexto vadoso com longos períodos secos alternando com breves períodos úmidos, com supersaturação das soluções, acompanhada por intensa evaporação e rápida precipitação dos cristais, que devido à presença de íons como  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  e outros, têm seu crescimento lateral inibido (VERRECCHIA e VERRECCHIA, 1994). Os referidos autores sugerem que a precipitação em bordas lisas tem relação com biomineralização e bordas serrilhadas ocorre por processos físicos/químicos em hastes biogênicas preexistentes.

Tucker e Wright (1990) destaca que a calcita fibrosa-aciculada constitui uma das feições típicas de climas mais secos, principalmente por causa da necessária acumulação de carbonatos no solo, pois em um clima mais úmido pode ocorrer altas taxas de dissolução e alto fluxo (perda), com pouco carbonato sendo acumulado. Mesmo com a afirmação de Verrecchia e Verrecchia, (1994) sobre a aparição de calcita fibrosa-aciculada em solos carbonáticos de climas temperados e periglaciais, é válido reconhecer que contextos ambientais mais secos, principalmente nos trópicos, é uma condição básica para explicar a presença muito frequente deste tipo de feição nos solos carbonáticos da bacia do rio Salitre.

A calcita fibrosa-aciculada só aparece nos perfis P3, P4 e P9, estes que estão situados nas mais altas declividades da topossequência, sendo certamente submetidos a uma maior perda de água nos solos. Portanto, além do alto teor de CCE (comum em quase todos os perfis analisados) e um clima com mais de 6 meses sem chuva, o maior ressecamento nos horizontes superficiais nestes perfis pode auxiliar no entendimento sobre a gênese destas calcitas aciculadas na área de estudo.

Além dos revestimentos e preenchimentos, ocorrem também nódulos carbonáticos representados por pequenos agregados esferoidais ou pisóides pedogênicos (FIGURA 24-V e 25-G e H), com medidas entre 1 e 1,5 cm de diâmetro, consistência dura quando seco, e firme quando umedecido. Essas feições são comuns em horizontes cálcicos, caliches ou calcretes em desenvolvimento (CALVET e JULIÁ 1983; ROBINS et al., 2015; ZUCCA et al., 2017).

Estruturas com formas esféricas ou elipsoidais podem variar de micrômetros a centímetros de diâmetro, sendo chamados de oóides se seu tamanho for inferior a 2 mm, e pisóides se o tamanho for superior a 2mm (ADAMS e MACKENZIE, 1998; ZUCCA et al. 2017). Estas estruturas são rodeadas por um córtex concêntricamente laminado (ZUCCA et al. 2017) ou por um capeamento ou envelopamento (CALVET e JULIÁ, 1983), o que ocorre nas feições observadas (FIGURA 24-V).

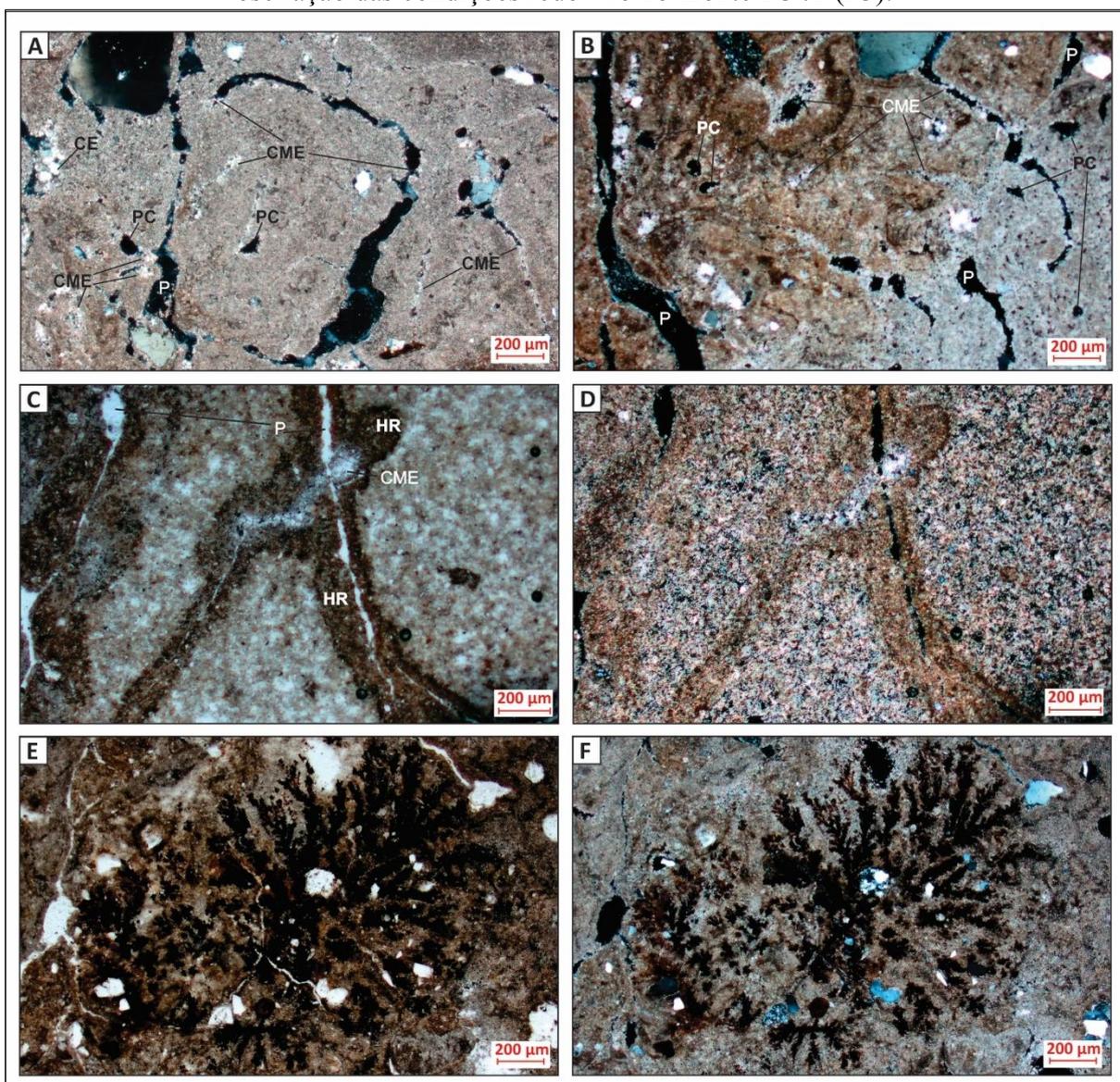
Um modelo de gênese para oóides e pisóides carbonáticos foi proposto por Robins et al. (2015), destacando a importância da precipitação de carbonatos em interação com as argilas presentes na matriz do solo (modelo físico-químico). Em primeiro lugar, os minerais precipitam a partir de filmes finos circunferenciais presos a grãos e microfeições por tensão superficial. Em seguida ocorre hidratação que confere comportamento plástico ao material, facilitando movimentos minúsculos, sucessivos, causados pela pressão da cristalização do carbonato pedogênico (gerada pelo crescimento do cristal) durante a evaporação das soluções do solo. As pressões geradas pela cristalização deslocam os grãos de maneira não uniforme, promovendo contatos distintos contra a matriz do solo. Ao longo do tempo, esta rotação em escala micrométrica aumenta a forma esférica destes agregados (ROBINS et al., 2015).

Para os autores citados, os minerais de argila são importantes neste processo, interagindo diretamente com os carbonatos, considerando sua capacidade de hidratação e plasticidade, além de sua mobilidade diante dos ciclos de umedecimento e secagem, que alimentam o movimento da pedofeição em formação. O deslocamento rotacional do pisóides poderia explicar sua superfície lisa e a fácil separação ou destacamento do “córtex”, que está diretamente associado à matriz do solo. Outra observação é que os pisóides estão rodeados (principalmente entre sua superfície externa e o córtex) por precipitados de calcita. Esta feição amplia o entendimento de que, para essa posição da paisagem, além da calcificação, está ocorrendo o processo de calcretização na área, atrelado ao estágio II descrito por Gile (1966) e Machette (1985).

O horizonte 2Crk1 foi interpretado como um saprolito do calcrete. A microestrutura é predominantemente fissural e em blocos angulares, com distribuição relativa porfírica, composição carbonática, limpidez salpicada e fábrica birrefringente cristalítica calcítica. Foi

encontrada grande variedade de tipos de poros, desde poros planares e câmaras, até cavidades (FIGURA 26-A e B). É sugestivo que alguns destes poros tenham como origem a dissolução dos carbonatos, principalmente as cavidades. Também ficou evidente a presença de revestimentos em paredes de poros por calcita microesparítica e preenchimentos por calcita esparítica e microesparítica em todos os tipos de poros. Os preenchimentos são densos completos e densos incompletos, e expressam a precipitação secundária do  $\text{CaCO}_3$ . Assim, o material teria sido afetado por processos intempéricos, inclusive dissolução, em um determinado período, e posteriormente houve a retomada da precipitação de calcitas nos poros, condizente com as condições pedogeomorfológicas e climáticas atuais.

Figura 26 - Fotomicrografias das feições que sugerem a dissolução e precipitação de  $\text{CaCO}_3$  e oscilação das condições redox no horizonte  $2C\bar{k}1$  (P3).



A e B = Fotos em XPL, com destaque para porosidade cavitaria e muitos revestimentos em paredes de poros e preenchimentos com calcita micrítica e microesparítica. C e D = Fotos em PPL e XPL respectivamente,

apresentando borda de poro fissural e canais com hipo-revestimentos de ferro e zonas de depleção de ferro no entorno, além de preenchimento de antigo poro com calcita microesparítica. E F = Fotos em PPL e XPL respectivamente, apresentando nódulo agregado de manganês, fortemente impregnado e composto por pequenos nódulos dentrícos. CE = Calcita Esparítica; CME = Calcita Microesparítica; HR = Hipo-revestimento de ferro; P = Poros; PC = Porosidade cavitária.

No saprolito também foi identificado hipo-revestimentos de oxi-hidróxido de ferro/manganês, seguindo os poros planares curvos (FIGURA 26-C e D). Lindbo et al., (2010) destaca estes hipo-revestimentos, classificando-os como pedofeições redox impregnativas, constituindo zonas onde Fe e/ou Mn oxidados que se acumularam em uma determinada parte do fundo matricial (borda de poros ou revestindo grãos minerais), devido a mudanças no estado de oxidação dos citados elementos. Os autores destacam a cor como uma das formas de diferenciação entre Fe e Mn, apontando que se a feição for dominada por óxidos de Fe, possui um croma mais alto (ou seja, aparecem mais avermelhados, amarelados ou acastanhados) do que o fundo matricial, e se os óxidos de Mn estiverem presentes nas feições, eles terão valor e croma mais baixos (aparecem mais escuros ou pretos).

No entorno dos hipo-revestimentos há manchas esbranquiçadas e acinzentadas que foram identificadas como zona de depleção de ferro, classificado por Vepraskas (2015); Lindbo et al., (2010) como pedofeições redox de depleção, que são zonas onde óxidos de Fe/Mn e/ou argila foram removidos devido à redução de Fe/Mn e posterior mobilização desses, isoladamente ou associado à argila, em um contexto com solos saturados, de tal forma que a água do solo praticamente não contém oxigênio dissolvido.

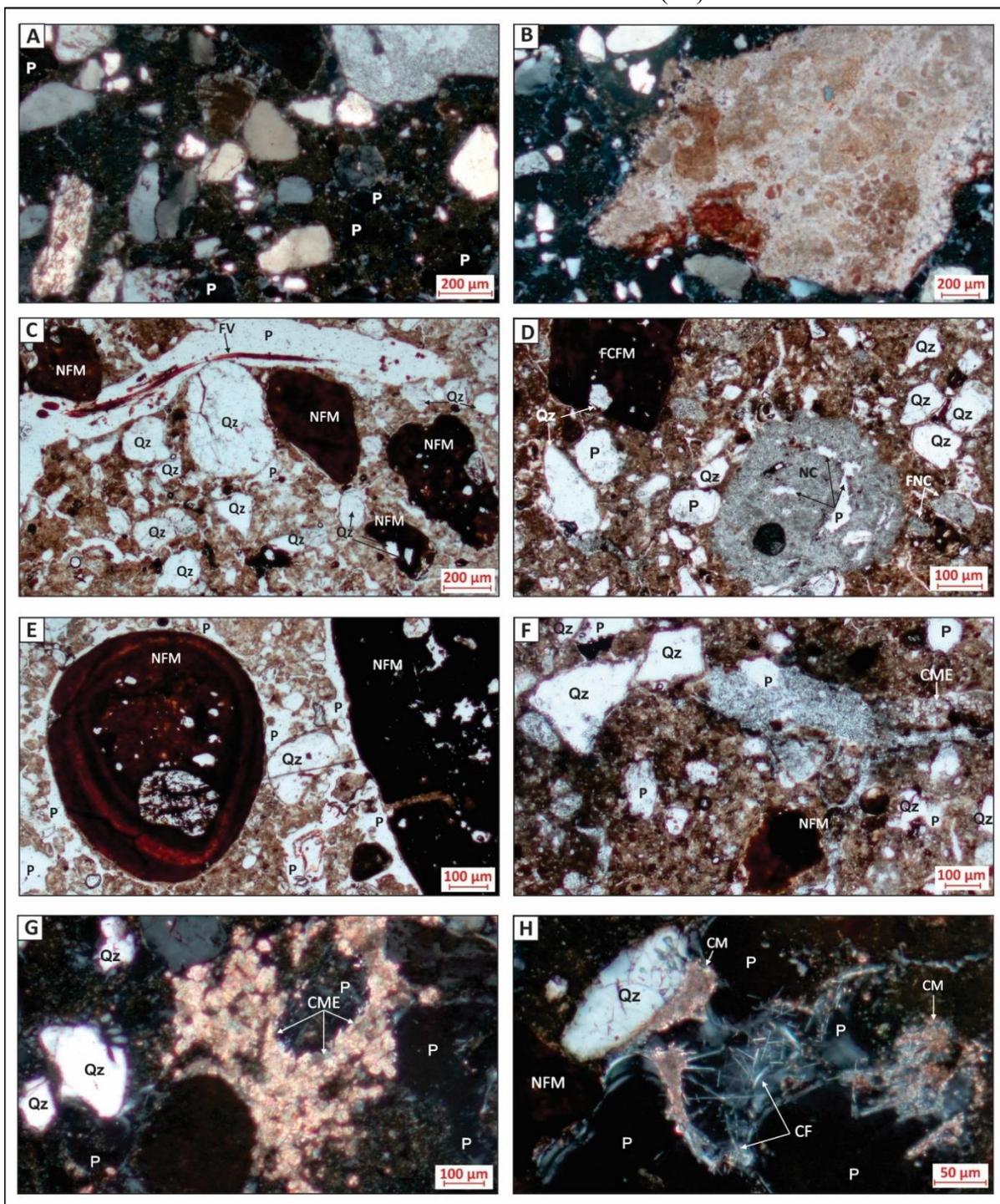
Também foi identificado nódulo agregado fortemente impregnado com coloração bastante escura, composto por pequenos nódulos detrícos (FIGURA 26-E e F) - termo utilizado por Stoops (2021) como subtipo do agregado. O autor afirma que esta feição frequentemente é formada por nódulos dentrícos de manganês e são comuns de áreas encharcadas. Testes de campo realizados sobre pequenos nódulos pretos, utilizando peróxido de hidrogênio, apontaram efervescência forte, confirmando a presença de manganês no horizonte 2Crk1.

Avaliando os dados apresentados e as interpretações das fotomicrografias, verifica-se condições pretéritas com maior presença de água na gênese das feições de hipo-revestimento, nódulos e depleções. Nas condições atuais, nem o clima e nem a declividade na vertente promoveriam encharcamento dos solos. Além disso, as feições de dissolução e a própria existência de um saprolito com mais de 1 metro de espessura, apontam para existência de climas menos secos no passado.

O horizonte C $\bar{k}$ 1 do P4 expressa a forte contribuição dos colúvios como materiais de origem dos solos da dfv. Como a micromorfologia é uma ferramenta eficiente na caracterização e distinção entre solos desenvolvidos *in situ* ou sobre materiais transportados, buscou-se avaliar na lâmina as evidências que atestam a natureza alóctone do material.

Seguindo algumas descrições apontadas por Múcher et al. (2010), os principais indicadores da natureza coluvial do material foram: i) presença de misturas de fragmentos de rochas carbonáticas e não carbonáticas; ii) presença de fragmentos angulosos de calcrete pedogênico semelhante aos encontrados no P1 (FIGURA 27-B); iii) presença de grãos de quartzo em tamanhos diversificados e formas predominantemente angulares e subangulares, distribuídos de maneira irregular no perfil (FIGURA 27-A); iv) predomínio de nódulos ferromanganosos anórticos (FIGURA 27-E) e v) fragmentos de pedofeições, como dos próprios nódulos.

Figura 27 - Fotomicrografias dos constituintes e feições que confirmam a natureza alóctone dos materiais no horizonte C $\bar{k}$ 1 (P4)

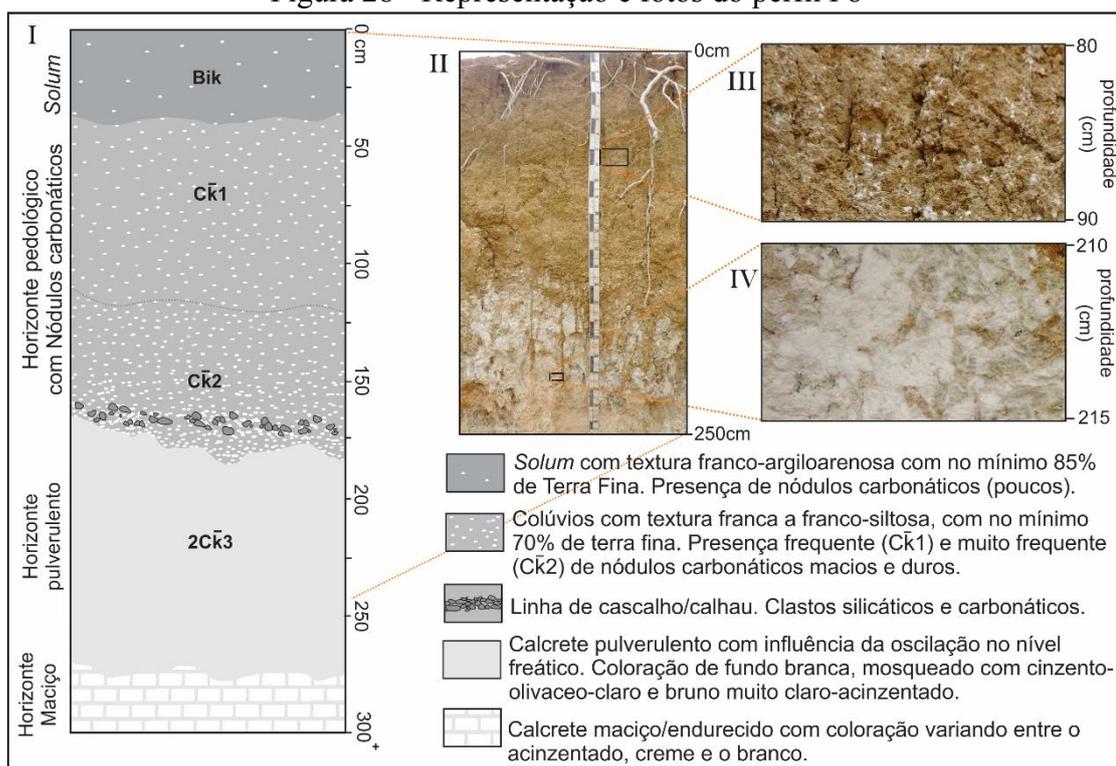


A = Foto em XPL, com destaque para grande variedade (dimensional e composicional) de grãos e fragmentos líticos, predominantemente angulares e subangulares. B = Foto em XPL, destacando fragmento de calcrite pedogênico. C = Foto em PPL, com nódulos anórticos típicos de ferro-manganês, grãos quartzosos com formas diversificadas, e fragmento vegetal (raiz). D = Foto em PPL com fragmento de nódulo de ferro (angulado) e nódulo anórtico carbonático com porosidade móldica. E = Foto em PPL exibindo grãos quartzosos no interior de nódulos anórticos de ferro-manganês. F = Foto em PPL indicando presença de nódulo órtico de ferro-manganês precipitados de calcita microesparítica, além de grãos de quartzo angulosos. G = Foto em XPL, com destaque para acumulação de calcita microesparítica. H = Foto em XPL revelando presença de calcita fibrosa aciculada e calcita micrítica. CF = Calcita Fibrosa Aciculada; CM = Calcita Micrítica; CME = Calcita Microesparítica; FNC = Fragmento de Nódulo Carbonático; FCFM = Fragmento de Concreção de Ferro-Manganês; FV = Fragmento Vegetal; NC = Nódulo Carbonático; NFM = Nódulo de Ferro-Manganês; P = Poros; Qz = Quartzo.

Também foram identificadas em P4 pedofeições formadas após os processos deposicionais, dentre as quais se destacam: i) bordas fragmentadas, digitadas e oxidadas de alguns fragmentos de rochas carbonáticas, sugerindo sua degradação e formação de micromassa; ii) impregnações de ferro na micromassa, com limites difusos e bastante irregulares, características atreladas, de acordo com Stoops (2021), às formações *in situ* de mosqueados e nódulos (FIGURA 27-D) e iii) precipitados de calcita microesparítica, na forma de preenchimentos (FIGURA 27-F) e calcita fibrosa como revestimentos (FIGURA 27-G). As feições i e ii estariam relacionadas a climas menos secos e as feições iii ao clima atual.

O P8 sintetiza as principais organizações micromorfológicas observadas na média vertente sobre baixa declividade (4%), ressaltando a relação entre os colúvios carbonáticos, em geral com baixa evolução pedogenética e *solum* pouco espesso (horizontes Ak e Bi $\bar{k}$ ), recobrendo calcretes esbranquiçados e pulverulentos (horizonte 2C $\bar{k}$ 3) (FIGURA 28).

Figura 28 - Representação e fotos do perfil P8

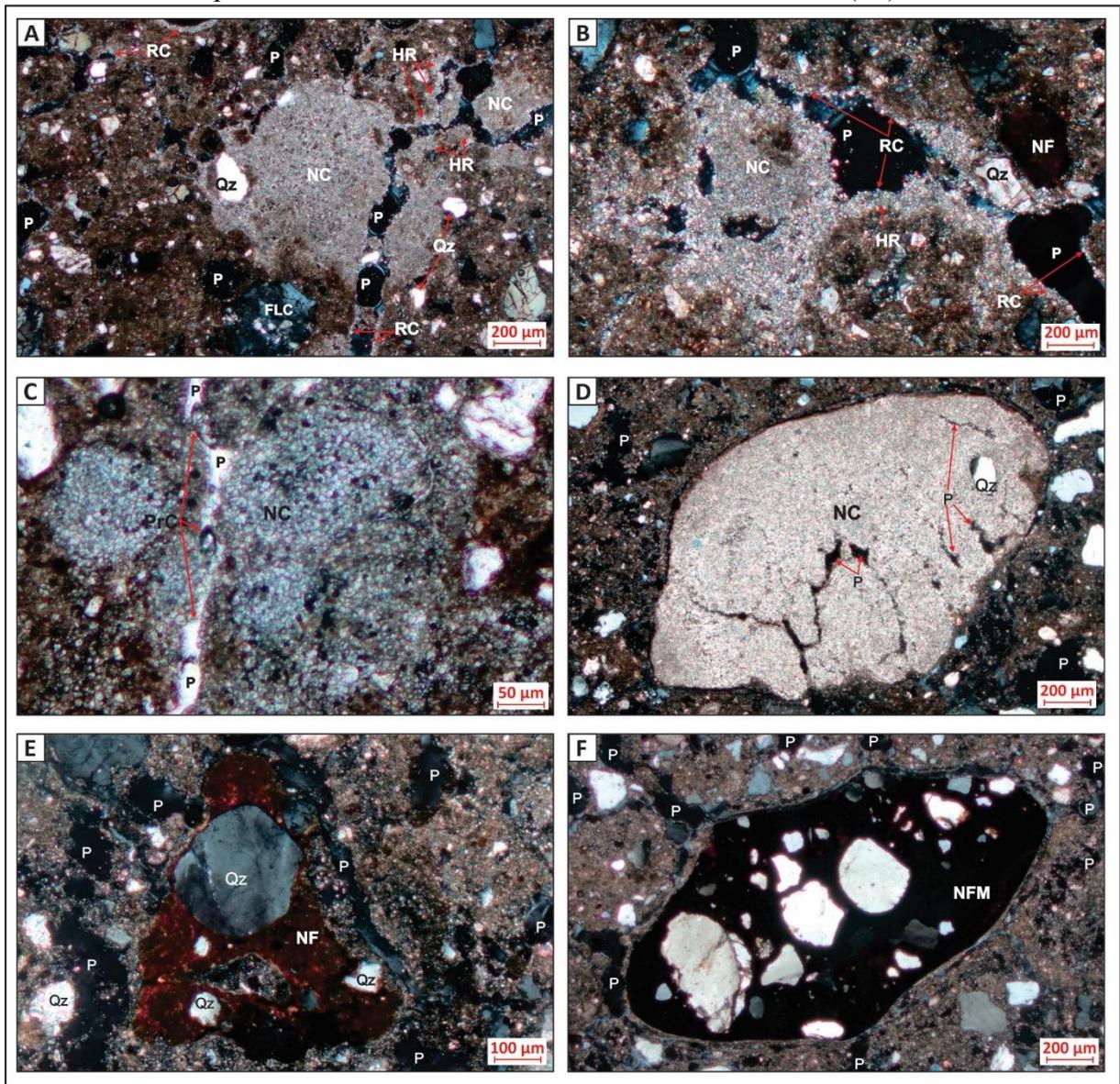


Obs: I – perfil esquemático (solos sobre calcrete); II – foto do perfil em campo; III – foto destacando nódulos carbonáticos (frequentemente) na massa do solo (C $\bar{k}$ 1); IV – foto do calcrete pulverulento (2C $\bar{k}$ 3).

Do ponto de vista micromorfológico, os revestimentos, hipo-revestimentos e preenchimentos (FIGURA 29 – A, B e C) permanecem como as pedofeições mais importantes nos solos da média vertente. Os primeiros são pedofeições em paredes de poros e superfície dos

blocos subangulares por calcita micrítica e microesparítica, e os hipo-revestimentos são formados a partir de soluções ricas em carbonatos e cálcio que penetram na matriz do solo (STOOPS, 2021; DURAND, et al., 2010), gerando impregnações em zonas da superfície dos grãos e microporos (CASTRO e COOPER, 2019) constituídos por calcita micrítica. Shankar e Achyuthan (2007) afirmam que a ocorrência de cristais calcíticos finos como hipo-revestimentos e feições calcíticas impregnadas pode ser o estágio inicial da acumulação calcítica pedogênica para formar nódulos. Já os preenchimentos também são gerados por calcitas micríticas e microesparíticas, que obstruem pequenos sistemas de poros fissurais, além de câmaras e canais, configurando feições densas incompletas.

Figura 29 - Fotomicrografias das feições de revestimentos, hipo-revestimentos, preenchimentos e nódulos dos horizontes  $Ck1$  e  $Ck2$  (P8).



A e B = Fotos em XPL, com destaque para revestimentos em paredes de poros e hipo-revestimentos calcíticos, além de formação de nódulos carbonáticos órticos. C = Foto em PPL de nódulo carbonáticos órtico e preenchimento por calcita micrítica e microesparítica. D = Foto em XPL apresentado nódulo carbonáticos anórtico com porosidade de dissolução. E e F = Fotos em XPL, apresentado nódulos de ferro órtico e nódulo de Fe / Mn anórtico respectivamente. FLC = Fragmento Lítico Carbonático; HR = Hipo-revestimento; NC = Nódulo Carbonático; NF = Nódulo de Ferro; NFM = Nódulo de Fe / Mn; P = Poros; PrC = Preenchimento Calcítico; Qz = Quartzo; RC = Revestimento Calcítico.

Os nódulos carbonáticos também constituem pedofeições marcantes nos horizontes  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$  do P8 (FIGURA 29 – A). Possuem consistência ora macia, ora dura, com formas esféricas e/ou subarredondadas, com tamanhos que variam de algumas centenas de micrômetros até aproximadamente 10 mm, e são formados por calcita micrítica. Estes representam um estágio mais avançados de calcificação que os revestimentos (ALÇIÇEK e ALÇIÇEK, 2014). Alguns nódulos órticos estão endurecidos e coalescidos, principalmente no horizonte  $C\bar{k}2$ , indicativo de avanço do processo de calcretização.

KHORMALI et al., (2006) aponta que os nódulos carbonáticos representam, de fato, uma etapa com maior acumulação de carbonatos, através da dissolução, movimentação dos carbonatos no interior do perfil e a recristalização, destacando a rápida precipitação de carbonatos gerada pelo ressecamento frequente e perda de  $CO_2$  da solução do solo. Estes dois últimos fatores podem explicar a alta frequência de nódulos nos horizontes subsuperficiais  $C\bar{k}1$  e  $C\bar{k}2$ , não sendo encontrados nos horizontes superficiais Ak com tanta frequência, já que esse naturalmente possui maior quantidade  $CO_2$  na solução do solo associada à matéria orgânica.

Alguns nódulos carbonáticos são anórticos (FIGURA 29 – D) e possuem natureza lito-reliquial, isto é, são associados a fragmentos de calcrete provenientes do platô carbonático. A linha de clastos quartzosos identificada na base do horizonte  $C\bar{k}2$  (FIGURA 28), fósseis de gastrópodes e outros moluscos no interior do perfil P8 reforça sua natureza coluvial. Estes nódulos, a exemplo do saprolito no P3, possuem porosidade interna ligada à dissolução dos carbonatos, igualmente do tipo vugular (CHOQUETTE E PRAY, 1970).

Muitos nódulos ferro-manganosos também podem ser observados, tanto de natureza órtica, quanto anórtica. Os primeiros possuem pouco mais de 0,5mm de diâmetro, limites nítidos, contorno sinuoso e irregular (ameboidal), com grau de impregnação moderado, coloração castanho avermelhada, sugerindo composição com predominância de Fe (FIGURA 29 – E). O nódulo envolve grãos de quartzo arredondados e subangulares, com tamanhos que variam de 30 a 300  $\mu m$ .

A tipologia anórtica é apresentada na FIGURA 29 – F e possui forma alongada, com 2 mm de diâmetro, limites nítidos, fortemente impregnado, coloração vermelho escuro a preto,

sugerindo composição de Fe e Mn. Esta pedofeição possui em seu interior grande quantidade de grãos de quartzo, mal selecionados, com formas bastante variadas e tamanhos entre 10 e 500 µm. Possuem, assim, fábrica interna muito semelhante àqueles observados na borda do platô, sendo essa provavelmente a sua fonte. Enquanto os nódulos anórticos se distribuem por todos os horizontes, os nódulos órticos estão concentrados na base do horizonte brunado, em transição com os materiais esbranquiçados, e por isso devem ter sua origem associada a condições de oscilação redox pretéritas (JACKS e SHARMA, 1995).

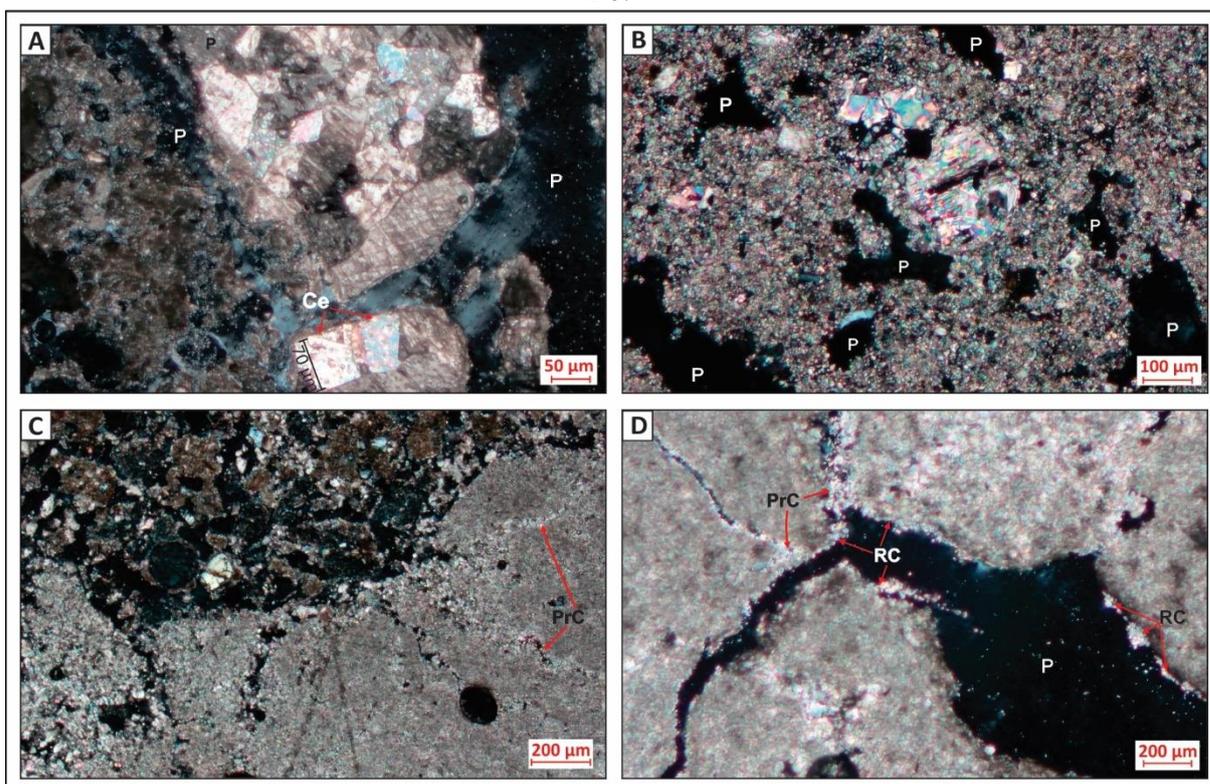
Apesar da relativa profundidade dos horizontes Ck (superando 2 metros em alguns pontos), o grau de desenvolvimento pedogenético é baixo, sendo que a espessura do perfil depende do maior ou menor aporte sedimentar, ou da erosão sobre eles. Além disso, as feições indicam, como nas posições a montante, o estágio inicial da formação do calcrete. Alguns aspectos podem explicar esse fato: o pouco tempo de deposição destes colúvios ou o pouco tempo de exposição dos mesmos ao contexto mais seco atual, e a instabilidade geomórfica gerada pela topografia local, que de acordo com Milnes (1992) e Alonso-Zarza (2003), controla a morfologia e o estágio de desenvolvimento dos calcretes, interferindo na circulação da água e nos processos erosivos na vertente.

Os horizontes 2Ck<sup>2</sup> e 2Ck<sup>3</sup>, respectivamente na base dos perfis P6 e P8 possuem, do ponto de vista micromorfológico, microestrutura maciça e cavitária, com distribuição relativa porfirica e porosidade planar e cavidades de dissolução, apresentando bordas serrilhadas e irregulares. O material fino possui natureza carbonática com trama birrefringente cristalítica calcítica e coloração branco acinzentado, e o material grosso apresenta-se poucos litofragmentos carbonáticos e grãos de quartzo, em frequência muito baixa, principalmente quando comparado com os horizontes superiores, evidenciando a descontinuidade de material de origem.

Trata-se de horizontes pulverulentos, e apesar de não ocorrer totalmente cimentados (não consolidados), representam calcretes denominados de “*chalky horizon*” (ESTEBAN e KLAPPA, 1983; WRIGHT, 2007; ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010). Estes materiais pulverulentos receberam influência genética da oscilação do nível freático no local, confirmada pela presença de mosqueados com cores acinzentadas ou esverdeadas, que representam ambientes sujeitos ao encharcamento, com ocorrência de remoção dos óxidos de Fe após redução microbiana (KHAN e FENTON, 1994). Alonso-Zarza et al. (2003); Arakel e Mcconchie (1982) corrobora com a ideia da presença de feições mosqueadas em calcretes associadas à influência da água subterrânea na sua gênese.

No horizonte 2C $\bar{k}$ 3 do P8 esses indícios micromorfológicos de encharcamento estão presentes. Além dos mosqueados, foi verificada presença abundante de calcita esparítica com cristais euédricos em várias partes da lâmina (FIGURA 30 – A e B), e por outro lado não foi verificada a presença de bioclastos ou fragmentos vegetais, como geralmente ocorre nos calcretes pedogênicos. Para Mack et al. (2000) e Durand et al. (2010), a ausência de feições biogênicas é uma característica marcantes dos calcretes formados sobre a influência da água subterrânea. Além disso, os perfis podem exibir cristais de calcita euédricos e em tamanhos maiores em direção a base do perfil. Também há, predominantemente, uma matriz micrítica com cimentos de calcita espática (*Sparry calcite cement*) (FIGURA 30 – B) como um aspecto marcante nos carbonáticos freáticos, corroborando com os autores mencionados acima.

Figura 30 - Fotomicrografias do calcrete pulverulento dos horizontes 2C $\bar{k}$ 2 do P6 e 2C $\bar{k}$ 3 do P8.

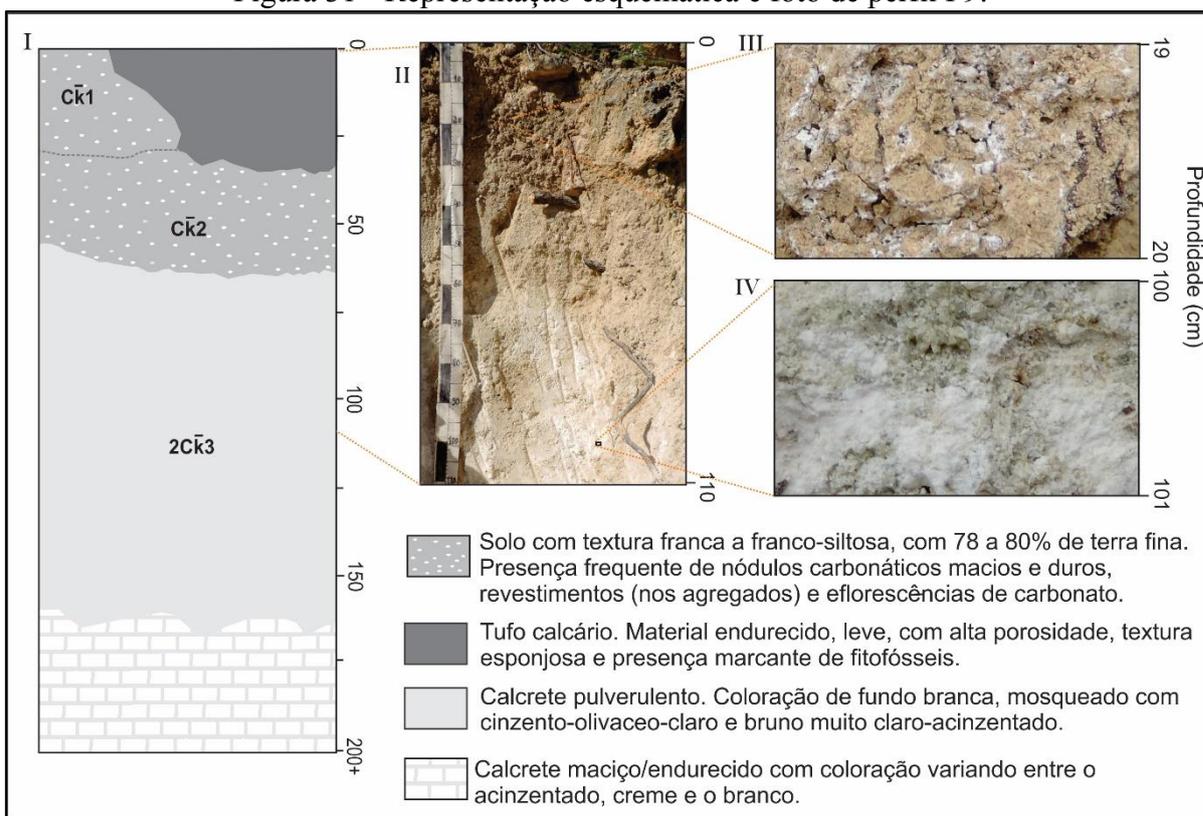


A = Foto em XPL, com destaque para feição de recristalização em cristais euédricos de calcita esparítica no horizonte 2C $\bar{k}$ 3 do P8. B = Foto em XPL, apresentando aspecto da porosidade cavitária e da recristalização de calcita em cristais maiores (microesparítica e esparítica) no horizonte 2C $\bar{k}$ 2 do P6, também representando os calcretes pulverulentos. C = Foto em XPL de uma zona de contato entre material em estágio mais avançado de pedoplasmação e alta porosidade) e os materiais com microestrutura maciça e apresentado alguns pontos com porosidade cavitária e preenchimento por calcita micrítica, horizonte 2C $\bar{k}$ 3 do P8. D = Foto em XPL, com destaque para preenchimentos e revestimentos em paredes de poros (horizonte 2C $\bar{k}$ 3 do P8). Ce = Calcita euédrica; P = Poros; PrC = Preenchimento Calcítico; RC = Revestimento Calcítico.

O horizonte de calcrete pulverulento, apesar da variedade tipológica de poros, apresenta relevante frequência da porosidade em cavidades, principalmente no P6, onde o horizonte está praticamente exposto à superfície e, conseqüentemente, mais alterado (FIGURA 30 – B), supostamente gerados por dissolução. Destaca-se também poros planares curvos e retilíneos, indicativo de expansão/contração do material. Os primeiros são mais estreitos, estão totalmente ou parcialmente preenchidos por calcita micrítica (FIGURA 30 – C e D) e os poros em canais comportam revestimentos calcíticos em estágio intermediário.

Ainda no compartimento dfv há solos geradas pela associação de calcretes pulverulentos e tufos calcários (travertinos meteógenos), que na topossequência podem ser encontrados dentro do perfil P9, posicionado na transição entre a média e baixa vertente, sobre declividade próxima de 10%. Um esquema é apresentado na Figura 31, que contém a organização de um perfil calcrete, com afloramentos de tufos no topo, associado com material coluvial e calcrete pulverulento, respectivamente no topo e base do perfil.

Figura 31 - Representação esquemática e foto de perfil P9.



Obs: I – perfil esquemático (solos sobre tufos e calcretes); II – foto do perfil em campo; III – foto destacando nódulos (frequentes) e revestimentos calcíticos na massa do solo (Ck1); IV – foto do calcrete pulverulento (2Ck3).

Os tufos encontrados do médio Salitre são leves (altamente porosos) e endurecidos, apresentando fósseis (visíveis a olho nu) de folhas e raízes, com porosidade secundária do tipo

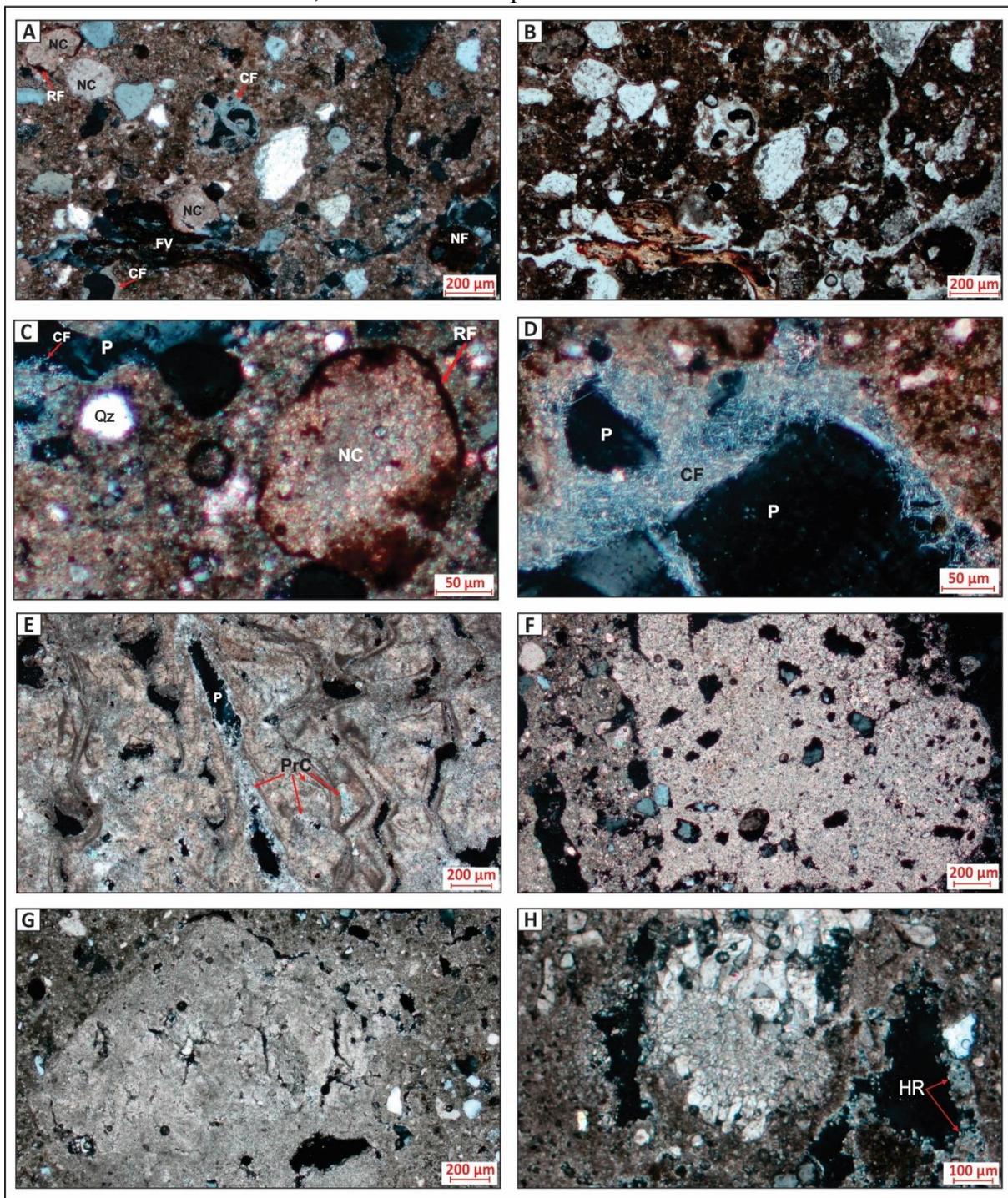
móldica e vugular, sendo esta última, possivelmente gerada pela dissolução/degradação do tufo com expansão da porosidade móldica. Viles e Pentecost (2007) afirmam que a maioria dos depósitos de tufos contém alta porosidade intergranular, e em decorrência da decomposição de plantas e raízes há significativa produção de uma porosidade secundária móldica.

Este perfil é um bom indicador da existência de clima mais úmido no Salitre, haja vista que a gênese dos tufos é favorecida por contextos ambientais onde há um significativo suprimento de água e alta temperatura média anual, isto é, condições pluviais mais úmidas que as atuais. Contextos ambientais mais propícios para a formação de tufos ocorrem no entorno de nascentes ou cursos d'água ricos em CO<sub>2</sub> e supersaturados em cálcio, geralmente associados à relativa abundância de material orgânico (VILES e PENTECOST, 2007; CAPEZZUOLI et al., 2014; JANSSEN et al., 1999), com presença marcante de remanescentes de macrófitas, invertebrados e bactérias (FORD e PEDLEY, 1996).

Na análise taxonômica realizada por Cristalli (2006), sobre três afloramentos de tufos calcários no Médio Salitre, foram identificadas: folhas microfilas e mesófilas, diatomáceas, clorófitas, cianofíceas, palinóforos e ostracodes. Para a autora os tufos foram depositados em um ambiente fluvial, com água em abundância. Auler e Smart (2001); Auler et al. (2004) apontam importantes episódios deposicionais de tufos (ou travertinos meteógenos) na bacia do rio Salitre, e associam estes a maiores valores de precipitações que os registrados atualmente. Os citados autores destacam dois grupos principais de idades, sendo os tufos mais velhos, datados por volta de 400.000 anos A.P., presentes em terraços sobre cotas altimétricas superiores, e outro grupo com tufos datados do início do Último Máximo Glacial até o início do Holoceno, localizados em alguns fundos de vales de pequenos afluentes efêmeros.

No perfil analisado (P9), estes tufos formam depósitos fragmentados, encontrando-se significativamente erodidos e parcialmente soterrados por materiais das encostas, possuindo espessura atual de aproximadamente 40cm. Em lâminas delgadas, as mesmas feições observadas anteriormente são destacadas, envolvendo feições que seriam atreladas a um clima semelhante ao atual, como nódulos carbonáticos órticos (FIGURA 32 – G), preenchimento com calcita fibrosa aciculada (FIGURA 32 – D) e preenchimento com calcita micrítica (FIGURA 32 – E); e a climas mais úmidos que os atuais, como zonas de acumulação/depleção de ferro, com revestimento de oxi-hidróxidos de ferro sobre nódulo carbonáticos (FIGURA 32 – C) e dissolução de nódulos carbonáticos (FIGURA 32 – F).

Figura 32 - Fotomicrografias de tufo calcário no topo e calcrete pulverulento na base do perfil P9, destacando feições de dissolução e revestimentos de argila e óxidos de ferro sobre nódulo carbonático, coexistindo com preenchimentos carbonáticos.



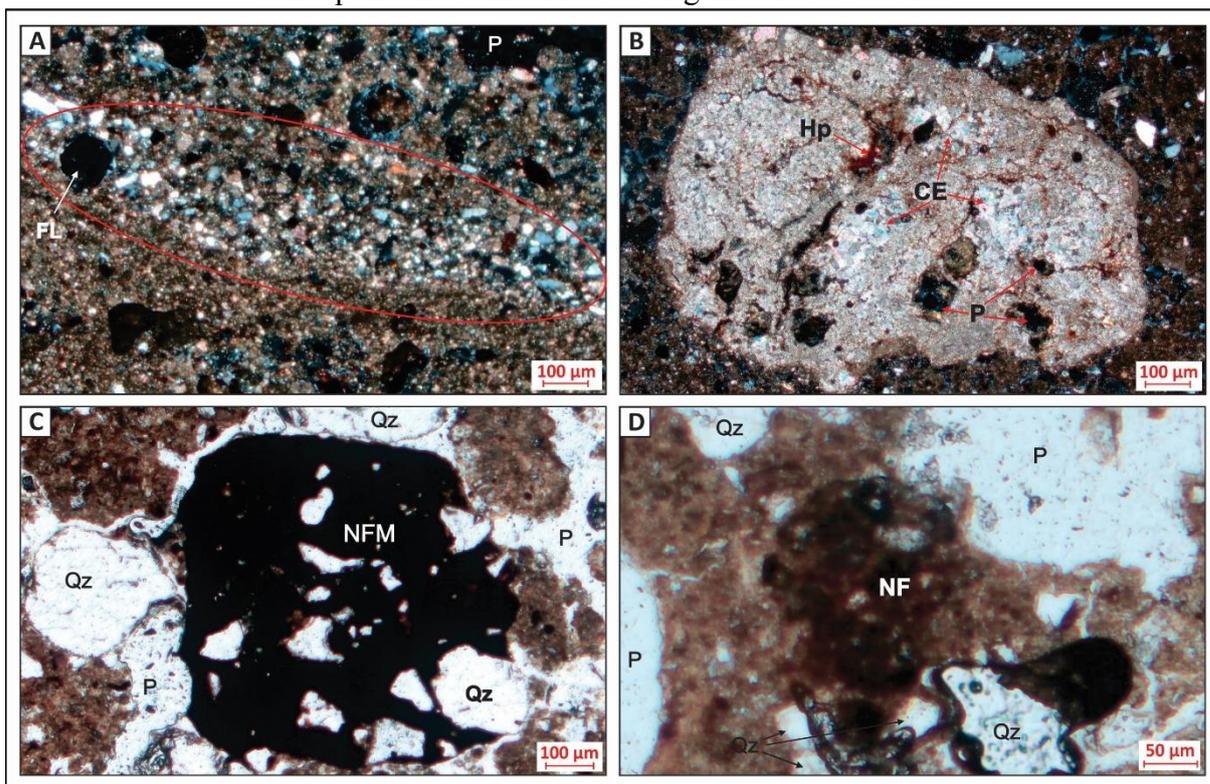
A = Foto em XPL apresentando fundo matricial e diversidade de pedofeições em um curto intervalo da lâmina no horizonte Ck1. B = Foto em PPL do mesmo recorte de A. C = Foto em PPL de um nódulo carbonático micrítico e microesparítico com revestimento de oxi-hidróxido de ferro, presente no horizonte Ck1. D = Foto em XPL no horizonte Ck1, apresentando preenchimento por calcita fibrosa-aciculada, com aparência de um ninho. E = Foto em XPL de lâmina realizada em amostra de tufo calcário com ênfase nos revestimentos e preenchimentos calcíticos presentes em poros móldicos. F = Foto em XPL, destacando nódulo carbonático com alta frequência de poros móldicos, presente no horizonte Ck2. G = Foto em XPL, destacando nódulo carbonático com alta frequência de poros móldicos, presente no horizonte 2Ck3. H = Foto em XPL, destacando nódulo de calcita esparítica e hiporevestimentos calcíticos em paredes de poros, presente no horizonte 2Ck3. CF = Calcita fibrosa-aciculada (*needle-*

*fibra calcite*); FV = Fragmentos vegetais; HC = Hipo-revestimento de calcita micrítica; NC = Nódulo Carbonático; NF = Nódulo de Ferro; P = Poros; PrC = Preenchimento calcítico; RF = Revestimento por oxi-hidróxido de ferro; Qz = Quartzo.

Os nódulos carbonáticos revestidos por ferro, de acordo com Kovda et al. (2016) podem atestar condições poligênicas no solo, com uma fase seca controlando os processos de nodulação, em seguida, por uma fase mais úmida. A existência dos nódulos calcíticos confirmam um período seco como primeira fase, e a concentração do Fe-Mn em forma de revestimento aponta para a existência de um momento de significativa umidade, com presença marcante do nível freático. Ferreira et al. (2016) também detectou presença de revestimentos de ferro sobre nódulos carbonáticos em CAMBISSOLOS HÁPLICOS Carbonáticos na Chapada do Apodi (RN), como pedofeições que contribuem para apontar a existência de mudanças climáticas regionais entre os períodos seco e úmido. Todos os nódulos calcíticos órticos observados não apresentam o revestimento por ferro, sugerindo que foram formados na fase seca atual.

Na baixa encosta, nas proximidades do leito fluvial, são encontrados materiais colúvio-aluviais, constituindo terraços, representado na topossequência pelo perfil P10. Do ponto de vista micromorfológico foi descrito o horizonte  $Bi\bar{k}1$ , com lâmina apresentando microestrutura bastante complexa com microblocos angulares e subangulares, além de áreas com microestrutura laminar, e incipiente formação de agregados granulares. Possui poros de empilhamento complexo, planares, cavidades, câmeras e canais. Há uma zona com distribuição relativa enáulica com espaçamento duplo, e outra porfírica com espaçamento simples. A micromassa é de natureza carbonática com limpidez salpicada/pontilhada e trama cristalítica calcítica, com coloração bruno-amarelada. Foi verificado presença marcante de fragmentos líticos carbonáticos, além de resquícios de estratificação em camadas, compostas predominantemente por grãos quartzosos bem selecionados, pequenos e predominantemente arredondados (FIGURA 33 - A).

Figura 33 - Fotomicrografias de lâminas extraídas do perfil 10 (P10) horizonte Bi $\bar{k}$ 1 correspondente a materiais de origem colúvio-aluviais.



**A** = Foto em XPL apresentando padrão bandeado na distribuição de componentes grossos, revelando influência de processos aluviais. **B** = Foto em XPL de nódulo anórtico de calcita micrítica, com poros móldicos, preenchimento com calcita esparítica e hipo-revestimento de oxi-hidróxido de ferro. **C** = Foto em PPL de um nódulo anórtico de ferro / manganês com grãos de quartzo em seu interior. **D** = Foto em PPL de um nódulo órtico de oxi-hidróxido de ferro, fracamente impregnado e limites difusos. CE = Calcita esparítica; FL = Fragmentos Líticos; Hp = Hipo-revestimento de oxi-hidróxido de ferro; NF = Nódulo de Ferro; NFM = Nódulo de Ferro e Manganês; P = Poros; Qz = Quartzo.

Esta estratificação em camadas compõem a organização e distribuição do material grosso em parte da lâmina, revelando, de acordo com Stoops (2021), um padrão bandado, onde a distância entre os indivíduos (grãos/fragmentos) no interior de uma banda (estrato) é menor do que a distância entre as bandas, condição frequente em solos desenvolvidos sobre materiais aluviais. Apesar da influência de processos fluviais na gênese destes materiais, atualmente não há interferência da dinâmica do rio nestes solos, exceto por alguma oscilação do freático na base do perfil. Neste sentido, torna-se apropriado o termo terraço, como um pequeno e estreito compartimento de relevo nas proximidades da planície de inundação do rio Salitre.

Neste material não foram reconhecidas pedofeições associadas ao enriquecimento em carbonatos (revestimentos micríticos e/ou preenchimentos de calcita fibrosa aciculada, por exemplo). O que se observa com frequência nas seções delgadas são nódulos litorreliquiais carbonáticos com feições de dissolução, como porosidade vulgar ou/e móldica (FIGURA 33 - B). Os nódulos são semelhantes aos encontrados a montante, revelando a influência dos

materiais da vertente na composição deste solo. Da mesma maneira, são encontrados nódulos anórticos ferro-manganosos com grãos quartzosos (FIGURA 33 - C) semelhantes aos encontrados no platô, alta e média encostas, sugerindo também influência de processo de vertente na constituição dos materiais deste terraço.

Foi verificada presença de nódulos órticos de oxi-hidróxido de ferro com limites difusos (FIGURA 33 - D), caracterizados por impregnação do fundo matricial (envolvendo grãos de quartzo e fragmentos líticos), semelhante ao identificado no platô (P2), podendo ser indício de um estágio intermediário para formação de um nódulo de Fe/Mn. De qualquer forma, confirma uma gênese “*in situ*”, geralmente atrelada a momentos de encharcamento (sazonal), capaz de viabilizar a movimentação e concentração dos óxidos.

#### **4.5. Considerações parciais: o que os solos dizem?**

De forma geral, as caracterizações morfológicas (macro e micro), física e química da cobertura pedológica ao longo da topossequência no médio curso da bacia do Salitre revelaram:

- Que ocorre o predomínio de solos desenvolvidos sobre as rochas (elúvios) no platô carbonático e de solos desenvolvidos sobre materiais transportados (colúvios e alúvios) na depressão de fundo de vale, com descontinuidade de material de origem na base dos perfis deste último compartimento.
- Que, independentemente da posição na topossequência e material de origem, todos os solos são carbonáticos, com pH alto, alta saturação por bases dominada por Ca, e estão entre os maiores teores de CCE já observados no Brasil.
- Que os substratos geológicos e pedológicos do platô carbonático influenciaram na composição dos colúvios a jusante.
- Que existem diversas pedofeições e atributos químicos que confirmam a atual vocação para a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nos solos em toda a topossequência.
- Que os materiais esbranquiçados visíveis por sensoriamento remoto nas imagens correspondem aos calcretes pulverulentos, de natureza freática e atualmente expostos à superfície pela erosão.
- Que os solos estão no estágio 2 de evolução de calcretes, sustentados por materiais da Formação Caatinga e colúvios relacionados.

- Que a grande quantidade de preenchimentos e revestimentos calcíticos nos poros pode ter como resultado a redução da sua permeabilidade, com interferências nas condições hidráulicas das vertentes.
- Que diversas pedofeições apontam a existência de condições paleoambientais menos secas que as vigentes, muitas vezes em um contexto cíclico com o semiárido atual (ou próximo deste).
- Que na baixa vertente a presença de terraço com natureza poligênica (com influência fluvial, coluvial, e da pedogênese) e com poucas pedofeições carbonáticas *in situ*, sugerem condições de encharcamento periódico, possível pela presença recente, mas não atual, do rio Salitre.

**S E Ç Ã O III - PROCESSOS PEDOGEOMORFOLÓGICOS SOBRE OS  
SOLOS CARBONATICOS NO MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO  
SALITRE**

## **5. DINÂMICA DAS VERTENTES A PARTIR DO DIMENSIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA EROSÃO LINEAR**

Este capítulo destaca a ação morfodinâmica presente na área de estudo, com forte participação da erosão, com formas claramente visíveis que limitam a evolução dos solos, expõem horizontes subsuperficiais, movimentam materiais nas encostas, entulham a rede de drenagem fluvial e modificam a topografia. A discussão é dividida em dois tópicos, sendo o primeiro com uma abordagem conceitual acerca da erosão linear e seu contexto teórico, fundamentais na apresentação e discussão dos resultados e dos estágios evolutivos da paisagem e o atual (inferido) desencadeamento da desertificação.

O segundo tópico apresenta os resultados numa perspectiva quantitativa e estatística, promovendo a identificação, mensuração e espacialização das feições erosivas lineares presentes na área, visando levantar elementos que comprovem o dimensionamento e impactos das ações dos ravinamentos e voçorocamentos, além de apontar o volume aproximado de solo retirado da encosta por estas feições erosivas e seus reflexos no leito do rio Salitre.

### **5.1. Erosão hídrica dos solos: ênfase nos processos erosivos lineares**

A erosão dos solos constitui uma das principais ações da morfodinâmica externa na evolução de vertentes, sendo responsável pela movimentação e redistribuição de grande volume de materiais com significativas alterações nas formas da superfície. Do ponto de vista socioambiental, a erosão se caracteriza como um dos mecanismos responsáveis pela redução das terras férteis e assoreamento de corpos hídricos, com sérias consequências para os ecossistemas naturais e para a economia.

Durante o escoamento superficial das águas pluviais, o fluxo hídrico nas encostas pode se comportar de forma difusa ou concentrada. No primeiro caso, o fluxo de água é mais ou menos simétrico e se movimenta por uma superfície suave com poucas irregularidades, provocando a erosão laminar ou em lençol (*sheet erosion*) (DESCROIX et al., 2008). Esse tipo pode representar o primeiro estágio de um processo erosivo progressivo, com perdas de solo incipientes e localizadas, como também, ao longo do tempo, ser capaz de eliminar todo o horizonte pedológico superficial (LE BISSONNAIS et al., 1998; TOY et al., 2002; GUERRA, 2010). A erosão laminar é causada pelo impacto da gota de chuva associada ao escoamento

superficial difuso, com desprendimento de partículas mais finas, sendo assim, de caráter seletivo nos materiais transportados (DESCROIX et al., 2008).

Na erosão laminar ou em lençol, a remoção dos solos ocorre de forma progressiva, sobretudo naqueles constituídos de partículas mais finas e pouco coesas, pois as partículas maiores (areia grossa e cascalho) possuem tamanhos relativamente grandes para serem arrastados pelo fluxo superficial (BIGARELLA, 2003). A erosão laminar, apesar de ocorrer de forma silenciosa e discreta na paisagem, é capaz de produzir marcas na superfície passível de reconhecimento visual, como exemplifica BARCELAR (2000), mediante a exposição de raízes de plantas na superfície e a remoção de horizontes superficiais. Barthes e Roose (2002) exemplificam ainda a alta pedregosidade na superfície do solo e a existência de pequenos pedestais.

Ao longo de uma vertente a maior velocidade da lâmina d'água, o salpicamento de gotas de chuva, as irregularidades no terreno (microtopografia) e a presença de obstáculos (vegetação e rochas, por exemplo) podem tornar o fluxo laminar turbulento e provocar a formação de inúmeros filetes e conseqüentemente evoluírem para uma erosão em canais (BARCELAR, 2000; BIGARELLA, 2003) ou linear (*linear erosion*) (SALOMÃO, 1994; FILIZOLA et al., 2003; CHAPLOT et al., 2005; SALOMÃO, 2010), caracterizada pelo fluxo de água concentrado, capaz de gerar incisões profundas no solo.

A erosão linear ou em canais pode ser dividida em sulcos (*grooves*), ravinas (*rills*) e voçorocas (*gullies*) (BARCELAR, 2000; BARTHES E ROOSE, 2002; FILIZOLA et al., 2003). Sulcos são canais rasos, efêmeros, descontínuos e podem ser naturalmente preenchidos com materiais carreados das margens. As ravinas já não teriam o caráter sazonal, e ocorrem quando o escoamento superficial concentrado aprofunda os sulcos e provoca avanço das cabeceiras para montante, arrastando maior número de partículas vertente abaixo. Isso significa que uma vez formada a ravina, existe grande possibilidade de sua evolução e do conseqüente aumento nas perdas de solo (BIGARELLA, 2003; SALOMÃO, 2010). A existência de ravinas ou sulcos numa determinada encosta indica um estágio erosivo relativamente avançado, pois a formação de canais pressupõe grande quantidade de solo removido.

Tanto a erosão laminar como a erosão em sulcos, assim como alguns ravinamentos, por não estarem necessariamente conectados aos sistemas fluviais, possuem grande importância na redistribuição dos materiais na superfície de uma vertente. Isso pressupõe importância morfogenética não apenas no rebaixamento e retirada, mas também na deposição de materiais.

Quando a erosão linear se desenvolve não apenas por influência do escoamento superficial, mas também por atuação dos fluxos de água subterrânea, tem-se a formação de

voçorocas, que se caracterizam por apresentar incisões mais profundas. Nas ravinas, a erosão é causada apenas pelo escoamento superficial concentrado, já as voçorocas possuem gênese mais complexa, tendo em sua evolução a ação combinada das enxurradas e do escoamento subsuperficial (IPT, 1986; BARCELAR, 2000; CASTRO 2005; AUGUSTIN E ARANHA 2006; SALOMÃO, 2010), além da existência de movimentos de massa nas paredes e nas suas cabeceiras (AUGUSTIN e ARANHA 2006; SALOMÃO, 2010). Em alguns casos, sulcos evoluem para ravinas que ao aprofundarem-se interceptam o nível freático, tornando-se voçorocas (FILIZOLA et al., 2003).

Se, para alguns autores, as voçorocas se formam por contribuição da dinâmica do escoamento subsuperficial, que assume protagonismo em sua evolução, para outros as voçorocas são classificadas quanto ao caráter dimensional, constituindo grandes feições erosivas, passível de se formarem apenas pelo trabalho do escoamento superficial. De acordo com Guerra (2003) e Poesen et al. (2003), voçorocas são feições relativamente permanentes nas encostas, estando associadas a processos de erosão acelerada, com alargamento e aprofundamento de ravinas. Guerra (2003) reconhece que algumas voçorocas têm sua origem na erosão causada pelo escoamento subsuperficial, mas cita o glossário de ciência do solo dos Estados Unidos que estipula limites dimensionais entre ravinas e voçorocas, sendo esta última com largura e profundidade superiores a 0,5m, valor também utilizado por Imeson e Kwaad (1980) e Poesen et al. (2003). Barthes e Roose (2002) estabelecem o valor de 30 cm para separar ravinas de voçorocas. Oliveira (2010) afirma que na literatura internacional predomina o caráter dimensional.

Para estudo da erosão linear é necessário o reconhecimento de uma dinâmica complexa e multifatorial, onde condicionantes de ordem natural e antrópica precisam ser analisados. Bacellar (2000) afirma que o aparecimento de voçorocas pode estar associado a uma condição natural do ambiente e aponta diversos condicionantes, direta ou indiretamente importantes, assim agrupados: geológicos, associados às características químicas e físicas das rochas, assim como da natureza estrutural do conjunto litológico; geomorfológicos, visualizados a partir da morfometria e morfologia; pedológicos, analisados diante das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, que em conjunto podem assumir maior ou menor resistência ao processo erosivo; climáticos, com foco principalmente no potencial erosivo das chuvas e sua influência na hidrologia da encosta, reconhecendo também a influência de paleoclimas na constituição atual das paisagens; biológicos, atrelados ao papel da cobertura vegetal na redução da erosividade da chuva e na erodibilidade dos solos. O referido autor aponta também condicionantes antrópicos, associados à ocupação irregular e ao manejo inadequado das terras,

admitindo que voçorocas possam ser geradas por intervenções antrópicas, mas afirma que são comuns voçorocamentos antigos, anteriores à ocupação humana, portanto atrelados à condicionantes de ordem natural, apontando que a atuação do homem não é um pré-requisito para seu desenvolvimento.

Chaplot et al. (2005) destacam que, para compreensão dos padrões espaciais da erosão linear, os paleoambientes e a evolução do relevo não podem ser negligenciadas. Avni (2005) aponta que processos erosivos lineares desenvolvidos em regiões áridas e semiáridas do Negev Highlands em Israel estão atrelados às mudanças ambientais condicionadas pela evolução da paisagem local, onde materiais de origem eólica, depositados no Pleistoceno Tardio, estão sendo paulatinamente removidos sob o atual clima holocênico, revelando condições naturais de readaptação do sistema geomorfológico ao contexto climático contemporâneo. Estas afirmações apontam para necessária avaliação dos condicionantes naturais, reconhecendo que a instalação da atividade erosiva numa paisagem pode estar relacionada a pré-disposições no ambiente, associadas às atividades morfogenéticas, e que a ação humana é um condicionante que contribui e/ou acelera a erosão.

Alguns autores dão grande ênfase ao papel exercido pelas atividades humanas como em Valentin et al. (2005), Keay-Bright e Boardman (2007), Molina et al. (2007) entre outros, que reconhecem a atividade erosiva como comumente associada ao uso indiscriminado da terra. Outros trabalhos afirmam que a erosão por voçorocas difundida nas regiões tropicais e mediterrâneas ocorre principalmente devido às condições litológicas, topográficas e ao clima, mesmo reconhecendo a significativa contribuição das atividades ligadas ao uso da terra (DESCROIX, 2008).

Portanto, há de ser reconhecer que os processos erosivos lineares representam sinais de grande instabilidade numa determinada encosta, provocada por alterações no ambiente, sendo os humanos apenas um dos agentes destas mudanças. Admite-se que a erosão numa encosta ocorre fundamentalmente pela existência de mecanismo naturais que geram predisposição ao seu desencadeamento, mas, ao mesmo tempo, é inegável a generalizada ocupação humana e sua ação desordenada nos territórios, capaz de acelerar ou desencadear feições erosivas lineares.

Pelos motivos expostos, no entendimento da gênese e evolução de sistemas erosivos, os fatores ambientais condicionantes (naturais e antrópicos) devem sempre ser avaliados em conjunto, considerando as peculiaridades de cada ambiente, pois o processo erosivo linear, como afirmam Augustin et al. (2012), constitui fenômeno presente em diversas regiões do planeta, em condições bastante variáveis de clima, solos, relevo e geologia, assim como em distintos níveis de ocupação.

A erosão linear é frequentemente a principal fonte de sedimentos em sistemas fluviais, e representa uma das principais causas de degradação da terra em todo o mundo (HUON et al., 2005; VALENTIN et al., 2005), além de ser reconhecida como uma das principais características do processo de desertificação em áreas áridas, semiáridas e subúmidas (AVNI, 2005). De fato, esse fenômeno representa amplo e avançado estágio de degradação das terras e de dissecação das encostas, representado pelo movimento de sedimentos vertente abaixo, provocando desequilíbrio na qualidade dos solos, na biota local e nos recursos hídricos.

## **5.2. Erosão linear e perda de solo nas vertentes no médio curso da bacia do rio Salitre**

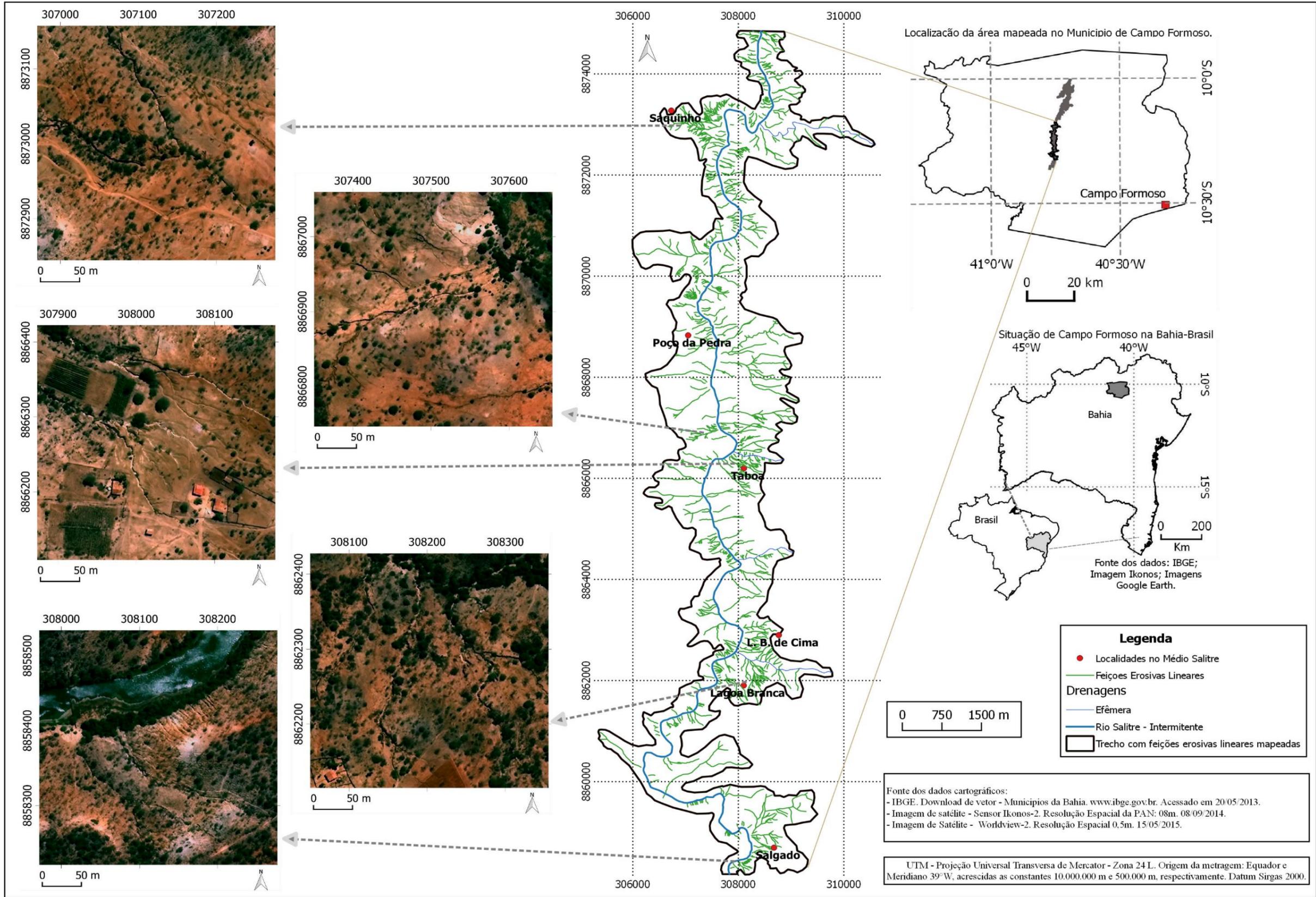
As marcas deixadas pela erosão dos solos constituem um dos fenômenos morfogenéticos mais visíveis na paisagem da área em estudo. Nesse sentido, foi realizado um estudo visando mensurar as dimensões desse processo na paisagem do médio curso da bacia do rio Salitre, com destaque para as feições geradas pela erosão hídrica linear. Foram focos da análise: a quantificação e a distribuição espacial das feições associadas à erosão hídrica linear nas vertentes; a estimativa da perda de solo nas vertentes por erosão linear, a partir das feições atuais; e a discussão sobre o entulhamento do rio Salitre.

### **5.2.1. Quantificação e distribuição espacial das feições erosivas lineares**

O aspecto mais perceptível da degradação das terras, na área de estudo, são as marcas deixadas na paisagem pelo intenso processo erosivo linear, que movimentou grande volume de sedimentos das encostas para o canal fluvial. Utilizando imagens de satélite com alta resolução espacial e SIG, foi realizado mapeamento das feições lineares (ravinas e voçorocas visualizadas na imagem) em um trecho de 20,78 km<sup>2</sup> (2.078 ha) correspondente a 25,9% da área delimitada e identificada como em avançado estágio de degradação das terras, expondo horizontes cálcicos (área total com 80,36 Km<sup>2</sup> ou 8.036 ha). O trecho mapeado se estende (norte-sul) por 17.1 Km ao longo do rio Salitre, desde a comunidade de Salgado até a comunidade de Saquinho, passando por Lagoa Branca, Lagoa Branca de Cima, Taboa e Poço da Pedra na porção central do município de Campo Formoso no médio curso da bacia do Salitre.

O mapa da Figura 34 exibe o resultado da digitalização das feições lineares sobre imagens do satélite Ikonos-2 e WorldView-2. O mapa apresentado foi confeccionado originalmente numa escala de 1:10.000, mas, para sua apresentação, foi necessária redução para escala de 1:80.000.

Figura 34 - Mapa das feições erosivas lineares em trecho localizado no médio curso da bacia do rio Salitre no Município de Campo Formoso-Bahia.



Obs.: À esquerda, recortes de imagem de satélite com alta resolução espacial (WorldView-2 datada de 14 de maio de 2015) apresentando algumas paisagens com significativa área com solos expostos e diversas feições erosivas lineares.

Os sistemas erosivos lineares analisados estão orientados, partindo das encostas orientais e ocidentais para o rio Salitre na porção central da área (orientação geral), e isso ocorre devido à própria configuração do relevo local, tendo o rio Salitre no fundo do vale, numa perspectiva Sul-Norte e encostas posicionadas a Oeste e a Leste.

Registrou-se 875 feições erosivas lineares visíveis na imagem, distribuídas em um complexo sistema de ramificações hierarquizadas, com comprimentos variando entre 14 m, para sublinhas nas altas encostas, até linhas principais com confluência direta nos canais fluviais, medindo 1.788 m, com comprimento médio de 199 m. De acordo com a Tabela 4, 72,2% das feições erosivas lineares são pequenas, entre 100 e 200 metros, constituídas principalmente por expressivos ravinamentos integrados a incisões lineares maiores. Outras feições intermediárias, entre 200 e 600m representam 23%, e entre 600 e 1.000m respondem por 3,3%. Apenas 1,5% possuem extensão maior que 1.000m.

Tabela 4 - Número de feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas) visualizadas em imagens de satélite de alta resolução espacial em trecho no Médio Curso do Salitre / Campo Formoso-BA.

Intervalos (m)	Feições Lineares (unidades)	Percentual (%)
0 a 100	367	41,9
100,1 a 200	265	30,3
200,1 a 300	86	9,9
300,1 a 400	56	6,4
400,1 a 500	43	4,9
500,1 a 600	16	1,8
600,1 a 1.000	29	3,3
acima de 1.000,1	13	1,5
Total	875	100,0

O último intervalo representado na Tabela 4 é constituído por canais com morfologia semelhante às drenagens fluviais efêmeras, com conformação topográfica côncava em planta, com muitos pontos de acumulação de sedimentos e fundo achatado, com forma mais aberta, além de maior densidade de cobertura vegetal em seu interior. Por esses canais passa grande fluxo de água durante as raras, mas intensas, chuvas, constituindo espécie de tributários laterais do rio Salitre, semelhante aos descritos por Tsukamoto, Ohta e Noguchi (1982), como bacias de ordem zero, representado pequenas unidades geomorfológicas com fluxo de água temporário (efêmero). É possível afirmar que estas incisões erosivas estão em estágio morfodinâmico mais avançado, sendo responsáveis pelos maiores avanços das cabeceiras das feições erosivas lineares (FIGURA 34), promovendo a maior abertura da depressão que margeia o rio Salitre.

Foi registrado um somatório de 145.526,48 metros lineares de voçorocas e ravinas, com distribuição espacial numa razão de 70,03 m/ha. Essa densidade é certamente muito alta, principalmente considerando o fato de estarem localizadas numa paisagem semiárida, com índice de chuva inferior a 500mm.

Todas as feições erosivas mapeadas nas vertentes estão conectadas à drenagem fluvial. Na área existem 275 pontos de conexão entre as incisões erosivas e os ambientes fluviais, isso quer dizer que existem 275 conjuntos de feições hierarquizados (muitos são canais individualizados, não possuindo necessariamente, sub-canais associados), depositando sedimentos no rio Salitre e afluentes efêmeros. Esta relação entre os sistemas erosivos e os canais fluviais aponta na direção de uma intensa atividade erosiva nas vertentes, induzindo modificações nas formas, ocorrendo a partir da escavação substancial com morfologias incisivas lineares nas encostas, retirando camadas superficiais e subsuperficiais dos solos e depositando nos canais fluviais, provocando seu entulhamento e elevação do nível de base local.

Nota-se no mapa da Figura 34 que há maior densidade de feições erosivas no entorno das comunidades de Salgado, Lagoa Branca, Lagoa Branca de Cima, Taboa e Saquinho. Nas proximidades das comunidades há maior exploração da terra, com a criação extensiva de caprinos, plantio de sisal, retirada de madeira, pequena irrigação, além da maior densidade de trilhas e estradas. Essas comunidades também representam os locais com ocupação mais antiga e teoricamente com mais tempo de exploração. Este fato não garante que a ocupação humana está desencadeando ravinas e voçorocas, mas certamente fortalece sua contribuição na intensificação dos processos morfogenéticos.

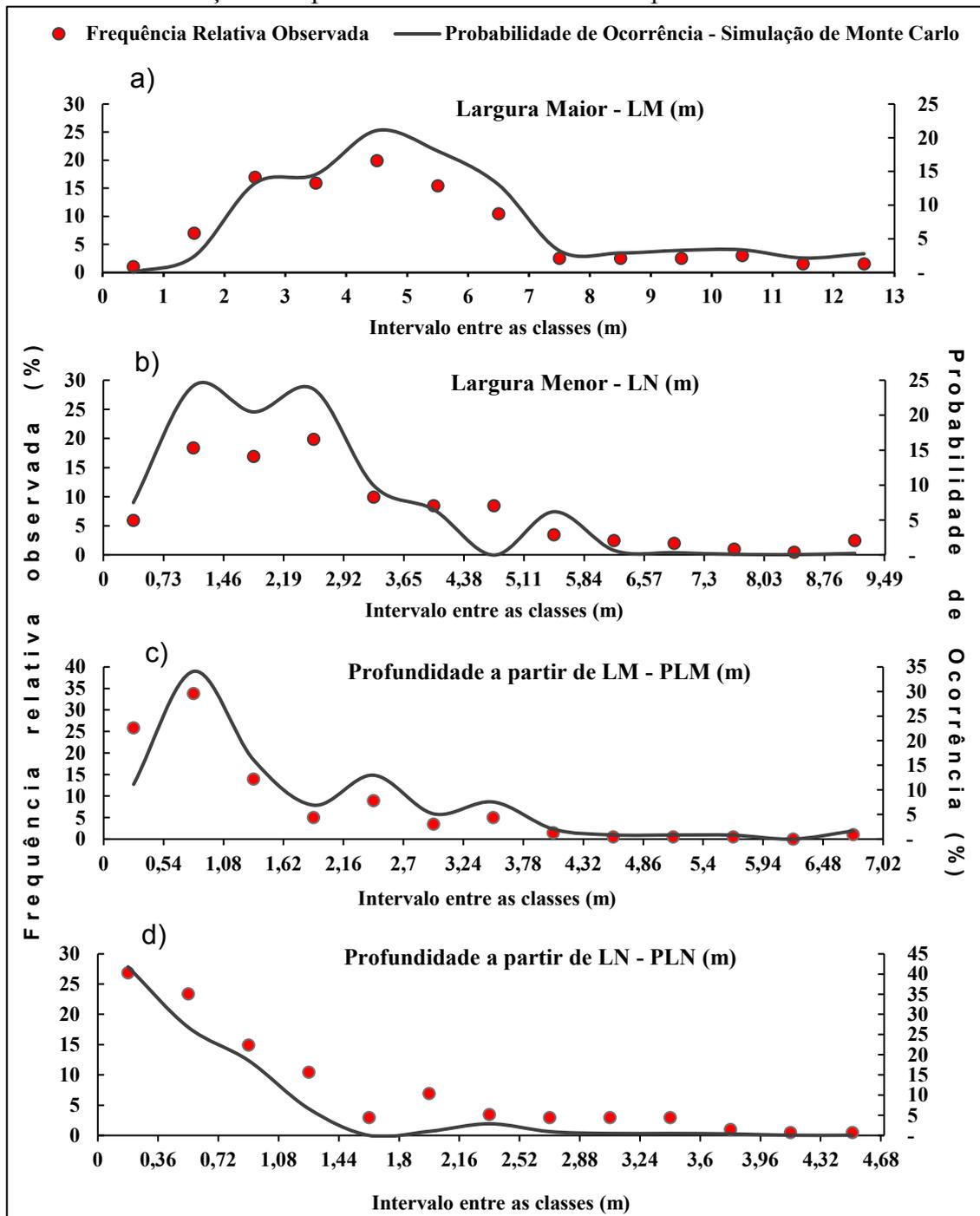
Ainda na mesma figura, há recorte representativos de algumas localidades (recortes de imagem de satélite de alta resolução - WorldView-2), e entre elas, por exemplo, está um trecho da comunidade de Taboa que exhibe diversas incisões erosivas lineares, orientadas de sudeste para noroeste. Essa imagem mostra que há significativa proximidade entre as feições erosivas e as residências (menos de 25 metros) e entre as feições e os pequenos lotes de irrigação. Há, nesse sentido, uma evidente constatação de que as ravinas e voçorocas ameaçam as moradias e as pequenas atividades econômicas desenvolvidas nas comunidades, uma vez que esse tipo de erosão é bastante agressivo, capaz de movimentar toneladas de solos das encostas.

### **5.2.2. Estimativa de perda de solo por erosão linear nas vertentes**

Para estimar a perda de solo por erosão linear, além do comprimento dos canais, foi necessário a mensuração em campo da profundidade, largura e forma das feições erosivas, isto é, projetar as dimensões dos canais numa perspectiva transversal ao seu eixo longitudinal. Esses dados receberam tratamento estatístico e em seguida foram utilizados na simulação de Monte Carlo. Foram medidas um total 201 seções transversais em campo, cobrindo 11 feições lineares distribuídas em toda área, aleatoriamente selecionadas (FIGURA 9), somando 4.117 metros de comprimento, representando 1,26% (quantidade de linhas) e 2,83% (comprimento) do total encontrado no trabalho de interpretação das imagens de satélite. Essa porção amostral, apesar de percentualmente pequena, possui significativa representação na área onde as condições pedológicas, climáticas, geológicas, topográficas, fitogeográficas e de uso da terra são semelhantes.

Para todas as variáveis observadas, a simulação de Monte Carlo se ajusta bem aos dados medidos, conforme apresentado na Figura 35. Os dados obtidos por meio de estudo de campo e simulados por Monte Carlo apresentam frequência relativa para as larguras e profundidades mensuradas em campo e compara os resultados das 9.701 seções transversais simuladas pelo Monte Carlo, cobrindo 145.526 m gerados pelo mapeamento (probabilidade de ocorrência). Os dados foram organizados em 13 classes.

Figura 35 - Gráficos com comparações de frequências relativas observadas e resultados das simulações das probabilidades de ocorrências pelo Monte Carlo.



Os dados apresentados na Figura 35 apontam para uma distribuição assimétrica com comportamento não normal. Com base neles, a não normalidade é confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov com 95% de confiança, não sendo possível usar os valores médios para estimar o volume de perda de solo por erosão linear.

Para LM (Largura Maior - largura a partir de pontos extremos na ravina/voçoroca), o intervalo entre as classes foi de 1,0m, sendo que os valores mínimos e máximos variaram entre 0,60 e 13 metros, com média geral de 4,9m, desvio padrão de 2,53 e o coeficiente de variação de 51,6%. Na Figura 35-A a classe com maior frequência relativa observada e maior probabilidade de ocorrência simulada pelo método de Monte Carlo foi aquela com intervalo entre 4 e 5 m. Também foi notado que em ambos (dados medidos e simulados), mais da metade estava na faixa de 2 a 6 m.

Para LN (Largura Menor - largura a partir de pontos no interior da feição erosiva), as 13 classes foram organizadas em intervalos de 0,73m, sendo que os valores mínimo e máximo encontrados foram de 0,40 e 9,50 metros, respectivamente, média geral de 2,96m, com desvio padrão de 1,92 e coeficiente de variação de 64,8%. A Figura 35-B indica que as classes com maior probabilidade de ocorrência foram aquelas dentro do intervalo entre 0,73 e 2,92 m, representando mais da metade dos FELs, sendo as classes de LN mais importantes na simulação de Monte Carlo.

Para a variável PLM (profundidade a partir de LM) as classes foram organizadas em intervalos de 0,54m, sendo os valores máximo e mínimo encontrados de 0,16 e 7,0 m respectivamente, média geral de 1,36m, com desvio padrão de 1,20 e coeficiente de variação de 88,34%. A Figura 35-C indica que a classe com maior probabilidade de ocorrência (quase 40%) foi aquela com intervalo entre 0,54 e 1,08.

Para a variável PLN (profundidade a partir de LN), as classes foram organizadas em intervalos de 0,36 m. Os valores máximo e mínimo encontrados foram de 0,08 e 4,70 m, respectivamente, média geral de 1,07 m, com desvio padrão de 0,96 e coeficiente de variação de 89,66%. De acordo com os dados da Figura 35-D, a classe com maior probabilidade de ocorrência foi aquela com valor médio de 0,2 m., dentro da primeira classe, sendo que 70% das incisões erosivas analisadas possuem PLN variando de 0,2 a 0,9 m., constituindo feições erosivas relativamente rasas.

No processo de mensuração em campo das seções transversais das FELs também foram observadas e registrada as formas das incisões (perspectiva transversal ao eixo longitudinal do canal), se em “U” ou “V”. A primeira possui paredes íngremes, próximas de 90° e fundo mais ou menos chato, demonstrado relativa homogeneidade das características estruturais e texturais dos solos e uma resistência relativamente uniforme à erosão linear. A forma em “V” aberta no topo e estreita no fundo, demonstra que os materiais do subsolo ou de horizontes mais profundos são mais resistentes que os do horizonte superficial (BACELLAR, 2000; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008; GEYIK, 1986). A forma da incisão foi outro fator que alimentou a

simulação de Monte Carlo, pois também contribui na quantificação da perda de solo na encosta pela erosão linear. Foi diagnosticada pequena diferença na quantificação do tipo de forma nos pontos mensurados, sendo 51,7% em forma de “U” e 48,3% em forma de “V”. Em síntese, pela pequena diferença percentual, pode-se entender que praticamente há equivalência em relação aos tipos de formas dos canais na área estudada. Em todas as feições erosivas analisadas, notou-se grande variação de formas ao longo de cada canal, havendo predominância do formato “U” para os trechos com maiores profundidades nas incisões, e predominância do formato em “V” para os trechos com menores profundidades.

De forma geral, as larguras e profundidades das feições erosivas apresentadas possuem pequenas dimensões em comparação com outras estudadas em diversas regiões do Brasil. Contudo, é fundamental considerar que as condições pedológicas e climáticas da área em estudo são bem distintas do restante do país, mesmo assim, a área possui alta densidade de ravinas/voçorocas ativas, certamente, acima dos padrões verificados no semiárido. A Figura 36 exhibe algumas fotos com feições erosivas com distintas morfometrias e em diferentes fases evolutivas.

Figura 36 - Fotos apresentando diferentes morfometrias de feições erosivas lineares.



a - Voçoroca com 4,5m de profundidade nos arredores da comunidade de Saquinho; b - Ravinamento na localidade de Poço da Pedra; c - Feição erosiva com incisão recente, com 1,5m de profundidade, nos arredores de Lagoa Branca; d - voçoroca com clara exposição dos horizontes subsuperficiais cálcicos na comunidade de Taboa.

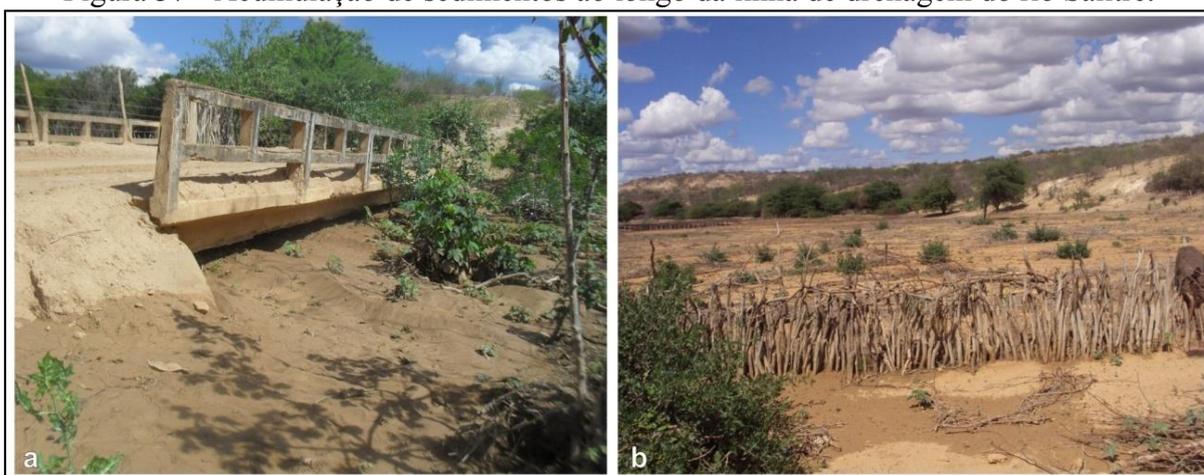
O Método de Monte Carlo, além de simular seções transversais para as feições erosivas na área, foi capaz de estimar um total de aproximadamente 515.000 m<sup>3</sup> de solo retirado das encostas pela erosão linear numa área de 20,78 km<sup>2</sup>. Esses valores correspondem ao material

retirado das feições erosivas atuais em uma área corresponde a aproximadamente 1/4 do total do compartimento de relevo dfv, que possuem características semelhantes quanto às formas, materiais e processos.

É válido considerar que há um número significativo de ravinas espalhadas pela área, conectadas às feições erosivas mapeadas, ou diretamente ligadas aos cursos fluviais, ou distribuídas em pequenas incisões independentes, ao longo das encostas que também não foram consideradas nesse trabalho, devido aos limites da resolução espacial das imagens de satélite. Portanto, os valores acima mencionados podem estar subestimados, pois não foram considerados canais inferiores a 50cm de largura, que possuem significativa influência no conjunto do processo morfodinâmico, conforme verificado em campo.

Uma das consequências imediatas da agressiva erosão nas encostas é a acumulação de sedimentos ao longo da linha de drenagem do rio Salitre (FIGURA 37). Nesse sentido, é importante considerar que as condições naturais de longos períodos de estiagem e a intermitência do rio Salitre não disponibilizam um volume suficiente de água no leito do rio para transportar parte dos sedimentos que chegam no canal fluvial, contribuindo, dessa forma, para seu entulhamento. Isso significa que os processos de vertente na área estão produzindo grande quantidade de sedimentos, que estão excedendo a capacidade de transporte do curso fluvial, como os episódios deposicionais apresentados por Moura e Silva (2001) no sudeste brasileiro.

Figura 37 - Acumulação de sedimentos ao longo da linha de drenagem do rio Salitre.



a - O entulhamento da drenagem elevou o nível de base e reduziu significativamente a profundidade do leito, aproximando o fundo do canal com a base da ponte (UTM-Zona-24L 307920E 8862549N); b - foto da paisagem ao lado da ponte, apresentando o leito seco do Salitre bastante entulhado e significativo alargamento da forma do canal.

Como a maioria dos 275 pontos de conexão entre as feições erosivas lineares e o leito do rio Salitre está nos trechos secos, pode-se inferir que as ravinas e voçorocas estão contribuindo diretamente para o entulhamento dos canais nesses pontos,

Com a obtenção dos valores do volume de solo retirado das encostas pelos atuais processos erosivos lineares (aproximadamente 515.000 m<sup>3</sup>), foi possível estimar o volume de sedimentos depositados por metro linear do rio Salitre e sua planície de inundação. Como a extensão do rio Salitre no trecho estudado é de 23.900 metros, estima-se que aproximadamente 22 m<sup>3</sup> de solo foram depositados em um metro linear ao longo do leito do rio e de sua planície de inundação.

O atual episódio deposicional altera a forma do canal fluvial, aumentando sua largura e elevando o nível topográfico do fundo do vale (nível de base). Essa mudança na topografia do fundo do leito impacta diretamente na dinâmica e no funcionamento do rio Salitre, reduzindo o número de dias de escoamento fluvial (vazão) de suas águas. Nesse sentido, a grande acumulação de sedimentos no fundo do vale dificulta a manutenção da água na superfície do leito do rio, mesmo em épocas chuvosas.

## **6. DINÂMICA DE VERTENTES E A EVOLUÇÃO DA PAISAGEM NO MÉDIO CURSO DA BACIA DO RIO SALITRE**

### **6.1. Dinâmica e evolução de vertentes em áreas semiáridas**

A vertente constitui uma importante categoria de análise na Geomorfologia, sendo capaz de representar a dinâmica dos processos atuais e pretéritos, assim como as formas resultantes na paisagem. Apesar da fundamental contribuição da geodinâmica interna, esta tese dará ênfase à dinâmica e evolução das vertentes a partir de mecanismos externos, atrelados a distintos atributos climáticos em um contexto temporal Quaternário. O foco está em paisagens semiáridas, mas convém reconhecer a instabilidade nos condicionantes atmosféricos do último período geológico e o papel da variação cíclica do clima na evolução das atuais vertentes. Isso porque diferentes condições climáticas têm se alternado ciclicamente durante o Quaternário, provocando variações na disponibilidade de água e nas relações entre o intemperismo e denudação das vertentes, deixando marcas evidentes na paisagem (BIGARELLA et al., 2003; MELO et al., 2005).

Aspectos sobre a evolução de vertentes em condições ambientais áridas e semiáridas foram destacados por diferentes pesquisadores, principalmente em estudos desenvolvidos na Geomorfologia, e que serviram de base para confecção de importantes modelos de evolução da paisagem.

Um dos mais importantes modelos de evolução do relevo foi desenvolvido por King (1953), conhecido como modelo de pediplanação. Este destaca o soerguimento crustal, dissecação com entalhamento da rede de drenagem, e processos de vertente, atribuindo importante papel para as condições climáticas semiáridas.

O ciclo evolutivo preconizado por King se inicia a partir de um soerguimento subcontinental e longo período de relativa estabilidade tectônica, com o estabelecimento de determinados níveis de base, seguido de um intenso trabalho de incisão e encaixamento das redes de drenagens. A partir desse estágio as principais ações de remoção de materiais ocorrem nas vertentes, daí se tem o alargamento dos vales através da regressão paralela das encostas, isto é, recuo com inclinação constante (da parte íngreme da encosta - free-face) sem ocorrer o rebaixamento dos interflúvios, e na base das encostas acumula-se sedimentos que formam uma superfície suave e com relativa concavidade, que se estende até o leito fluvial, denominada pedimento. A continuação na regressão das vertentes removeria as porções altas do relevo, configurando pequenas saliências na dimensão da paisagem, promovendo a união de

pedimentos que originam uma grande superfície aplainada chamada de pediplano (CHRISTOFOLETTI, 1980; VALADÃO, 1998).

Baseados nas ideias da pediplanação e sob influência da Geomorfologia Climática, Bigarella et al. (1965) desenvolveram um modelo de evolução das vertentes fundamentado na alternância de climas (entre o úmido e o seco), reconhecendo que em condições úmidas ocorre incisão fluvial e entalhamento da rede de drenagem (formação de vales). A partir daí, com a progressiva mudança climática para contextos mais secos (árido e semiárido), ocorre abertura dos vales com recuo das vertentes e entulhamento dos canais fluviais, elevando o nível de base local. Na formação do pedimento, verifica-se um recuo das vertentes íngremes por degradação lateral deixando à jusante um plano côncavo suavemente inclinado. O declive aumenta para montante, passando para uma encosta com forte inclinação convexa (escarpa com face livre), sendo que nessa passagem, geralmente, há forte mudança no ângulo da declividade da vertente (BIGARELLA et al., 1965). Esta ideia aproxima-se do Princípio de Huntington (TUCKER e SLINGERLAND, 1997), que aponta o predomínio de processos denudacionais nas encostas com agradação nos sistemas fluviais durante climas secos, e estabilização das vertentes com incisão fluvial em um contexto mais úmido.

Casseti (2005), ao abordar as etapas evolutivas de relevos tabuliformes da região central do Brasil, para o final do Cenozóico e início do Quaternário, aponta o recuo paralelo das vertentes como um dos fenômenos importantes na modelagem de parte da paisagem brasileira, estando atrelada a paleoclimas áridos e/ou semiáridos. O referido autor apresenta a relação entre forças epirogenéticas e alternâncias climáticas (entre o úmido e o seco) como condições básicas para evolução da paisagem.

Ab'Saber (1969a; 1969b) destaca que, no semiárido do nordeste do Brasil, o recuo das vertentes é praticamente generalizado, porém com diferenciações locais em função das características das encostas, da maior ou menor concentração das chuvas, dos solos, e da densidade de cobertura da caatinga, que podem reduzir ou acelerar o processo.

Outro importante modelo desenvolvido sobre evolução da paisagem, e que abarca conhecimentos sobre dinâmica em vertentes, foi baseado na teoria da bio-resistasia, desenvolvida por Erhart na década de 1950. Este modelo também incorpora a relação entre variações climáticas e a morfodinâmica nas vertentes, quando destaca a existência de dois períodos que intercorrem com as variações climáticas, o de biostasia e o de resistasia (GUNNELL E BOURGEON, 1997; MELO et al., 2005; ZINCK, 2016). O primeiro teria uma relativa estabilidade ambiental, em condições com umidade e temperatura elevadas, com intemperismo químico pronunciado e denudação química, atrelado à remoção de elementos

solúveis e significativo desenvolvimento dos solos. O segundo estaria em desequilíbrio climático com instabilidade ambiental, em um clima com déficit hídrico (climas áridos e/ou semiáridos), redução da cobertura vegetal, predominância do intemperismo físico com produção de sedimentos grossos, além da ação significativa de processos mecânicos de remoção de sedimentos nas encostas (MELO et al., 2005; ZINCK, 2016).

Inspirado na teoria da bio-resistasia, Bertrand (1968; 2004) apresenta dois conjuntos dinâmicos de paisagens, baseados no sistema de evolução e na atividade geomorfogenética que ocorrem nas vertentes, seriam eles os geossistemas em biostasia e os geossistemas em resistasia. Os conjuntos são subdivididos em distintos níveis, considerando o sentido geral da dinâmica, se progressiva, regressiva ou em condição de estabilidade. Para o autor, nos geossistemas em biostasia a atividade geomorfogenética é fraca ou nula, e o sistema de evolução é dominado pelos agentes e os processos bioquímicos, como a pedogênese. Nos geossistemas em resistasia, a geomorfogênese domina, onde a erosão, o transporte e a acumulação dos detritos levam a uma mobilidade das vertentes, com alteração na organização do sistema ambiental, em maior ou menor grau.

Entre outros fatores apresentados, Bertrand (2004, p. 150) aponta que regiões com climas áridos e semiáridos possuem condições mais próximas da geomorfogênese, onde afirma que “*a erosão faz parte do clímax, isto é, ela contribui a limitar naturalmente o desenvolvimento da vegetação e dos solos*”. Obviamente que na dinâmica de uma vertente inúmeros condicionantes devem ser analisados conjuntamente, desde atividades tectônicas, constituição dos materiais, elementos topográficos, clima, vegetação e ações antrópicas.

Tricart (1977) também se inspira na bio-resistasia para classificar três grandes tipos de meios morfodinâmicos, em função da intensidade dos processos na paisagem, são eles: meios estáveis, meios *intergrades*, e meios fortemente instáveis. Nos meios morfodinâmicos estáveis, há predominância das atividades pedogenéticas, que ocorrem em baixas declividades topográficas, com vertentes em lenta evolução, e, estando sempre associada à cobertura vegetal suficientemente fechada que protege os solos e a superfície. Os meios *intergrades* representam a passagem gradual e contínua entre as situações ambientais dos meios estáveis e dos meios instáveis. Nos meios morfodinâmicos fortemente instáveis, a morfogênese é predominante na paisagem. Para esta condição, entre os vários exemplos citados pelo autor, estão: áreas sob vulcanismos ativo; áreas com alta pluviosidade em encostas suficientemente declivosas com significativa dissecação e incisão de cursos d'água; áreas com significativa alteração antrópica; e áreas semiáridas. O clima semiárido, obviamente combinado com outros fatores, é capaz de produzir significativo trabalho morfodinâmico, e isso ocorre devido às intensas chuvas que

ocorrem em um contexto com grande irregularidade anual na distribuição das precipitações (uma alta taxa de descarga pluvial em curto tempo) associado a uma vegetação mais aberta, que permite o desenvolvimento da erosão pluvial (TRICART, 1977).

Em regiões com clima semiárido a taxa de produção de partículas por intemperismo nas vertentes é geralmente menor do que a de sua remoção por agentes eólicos e hídricos. Obviamente, a cobertura vegetal, intimamente relacionada ao clima e aos solos, exerce uma influência importante sobre esse equilíbrio. Portanto, pode-se dizer que, o grau de aridez controla o equilíbrio entre a produção e a remoção de partículas numa determinada vertente (ELORZA E MARTINEZ, 2001)

Outra teoria que também destaca o papel do clima semiárido na evolução do modelado é a Planação Climática (MILLOT, 1983) desenvolvida com base em estudos feitos no continente africano por pesquisadores franceses. Esse modelo de evolução da paisagem constitui uma variação francesa da teoria da Etchplanação, que consolidou, na análise geomorfológica, o importante papel desempenhado pelo intemperismo na dinâmica morfológica (VITTE, 2005).

Para Millot (1977; 1983), o intemperismo inicial que ocorre sobre as rochas, a partir da lixiviação dos elementos solúveis e as transformações de minerais primários em minerais secundários, ocorre com a manutenção de estruturas petrográficas originais e conservação de volumes, constituindo alterações, chamadas pelo autor de isovolumétricas. Isso quer dizer que os processos intempéricos iniciais transformam as estruturas, mas não alteram as formas, desempenhando apenas um papel preparatório para modelagem do relevo. A diminuição do volume ocorre a partir de transformação, degradações e migrações internas do material anteriormente alterado, provocando rebaixamento no modelado com mudanças na inclinação da vertente. O desenvolvimento dos horizontes pedogenéticos é acompanhado de significativas modificações estruturais com diminuição no volume do material, também acarretando o rebaixamento do relevo. A etapa seguinte seria a erosão superficial da cobertura pedológica, que intensifica a evolução do modelado, conduzindo-o ao aplainamento. Portanto, o intemperismo, a pedogênese e as ações mecânicas de superfície contribuem para a geomorfogênese, reconhecendo que a pedogênese é uma ferramenta intermediária transformadora entre as alterações iniciais e a modelagem mecânica superficial.

Sob climas tropicais regulares, com estações úmidas e secas, os três citados mecanismos atuam: intemperismo geoquímico, transformação pedológica e erosão superficial. Períodos úmidos favorecem uma profundidade crescente de intemperismo e a pedogênese. Períodos ou épocas mais secas favorecem a erosão e a remoção lateral. Em equilíbrio, esses mecanismos,

vinculados a distintas condições de temperatura e umidade, progridem juntos. Assim, as formas evoluem e podem gerar pedimentos. Sob climas mais áridos, a frente de intemperismo cessa, e a erosão superficial é mais agressiva, de modo que o processo de exumação remove das vertentes, totalmente ou parcialmente, os horizontes pedogenéticos e alteritas, expondo as frentes de intemperismo, conduzindo a paisagem ao aplainamento generalizado (MILLOT, 1977; 1983). Assim, na teoria de Millot, a sucessão de climas úmidos e secos ao longo do tempo geológico tem importância marcante na evolução da paisagem, reconhecendo que os processos mecânicos superficiais dos climas áridos e semiáridos agem com maior eficiência no aplainamento das superfícies.

Estas teorias, baseadas na alternância climática, apesar de serem importantes na explicação sobre a evolução das paisagens brasileiras no Quaternário, recebem algumas críticas, principalmente por desprezarem os diferentes níveis de resistência do substrato rochoso. As características estruturais e litológicas do substrato exercem grande influência nos processos superficiais existentes nas vertentes, sendo um dos condicionantes na intensidade do intemperismo e na erosão diferencial (FREITAS, 2007). Christofolletti (1980) acrescenta que a variação topográfica e os perfis de vertentes são aproximadamente iguais dentro de um determinado tipo de rocha, mas diferem muito de uma litologia para outra.

A morfogênese atuante nas vertentes no semiárido certamente possui forte dependência de parâmetros da pluviosidade e das características da caatinga, mas também, como em qualquer outro ambiente, os processos estarão fortemente influenciados pela composição dos materiais (solos e rochas), que aceleram ou retardam os mecanismos responsáveis pelas alterações.

## **6.2. Paleoclimas Quaternários do semiárido brasileiro: foco na bacia do rio Salitre.**

O objetivo deste tópico é apresentar estudos que confirmem a existência de importantes alterações nos padrões climáticos do atual semiárido brasileiro, geradas principalmente por ciclos de maior umidade intercalados por períodos de semiaridez, responsáveis pela configuração de distintos agentes, culminando em diferentes paisagens, dentro do Quaternário. A compreensão destas mudanças torna-se fundamental no entendimento sobre a evolução dos solos e dos processos de vertente na área de estudo.

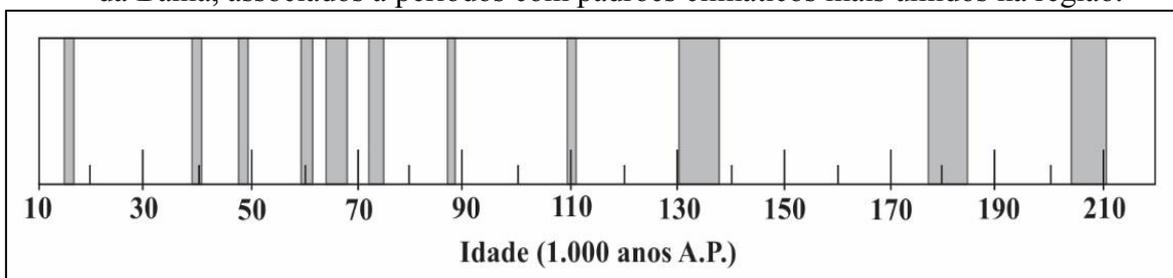
Os dados paleoclimáticos disponibilizados para o semiárido do nordeste brasileiro ainda não são suficientes para desenhar um panorama mais preciso do comportamento do clima no Quaternário, mas alguns cenários podem ser apresentados com base em alguns estudos

paleoecológicos, geoquímicos, paleontológicos e geomorfológicos (DE OLIVEIRA et al., 2014).

Estudos desenvolvidos por Auler e Smart (2001); Auler et al. (2004); Wang et al. (2004b); Wendt (2015) estão entre os mais importantes estudos geocronológicos voltados para a compreensão sobre oscilações climáticas quaternárias do interior do nordeste do Brasil. Estes são trabalhos, totalmente ou parcialmente, desenvolvidos na bacia do Salitre, com foco nos materiais carbonáticos gerados em condições mais úmidas que o clima semiárido atual, associados ao crescimento de espeleotemas em cavernas e a deposição de travertinos.

Baseados nos citados materiais carbonáticos em cavernas no atual semiárido do estado da Bahia, incluído a bacia do rio Salitre, e utilizando datação pelo método U/Th, Wang et al. (2004b) apontam vários episódios de crescimento de espeleotemas, diretamente associados com ambientes mais úmidos (FIGURA 38), destacando que tais fases ocorreram em períodos curtos, de centenas ou poucos milhares de anos, nos últimos 210.000 anos A.P. (antes do presente). Para os autores, estes episódios eram separados por dezenas de milhares de anos, indicando intervalos prolongados de condições mais secas, pontuadas por curtos períodos mais chuvosos. Estes últimos correspondem a menos de 10% da faixa de tempo analisada.

Figura 38 - Fases de crescimento de espeleotemas em cavernas no atual semiárido do estado da Bahia, associados a períodos com padrões climáticos mais úmidos na região.



Fonte: Wang et al. (2004b); Auler et al. (2004)

Auler et al. (2004) também analisaram as idades de depósitos de travertinos (análises de isótopos  $^{230}\text{Th}$ ) no vale do Salitre e Jacaré na Bahia, confirmando período mais úmido por volta de 12.000, entre 21.000 e 23.000 anos A.P., entre cerca de 330.000 e 460.000 anos A.P., e, por estimativa aponta período úmido existente a cerca de 910.000 anos A.P.

As fases úmidas do semiárido brasileiro estão associadas aos períodos de resfriamento do planeta durante o Quaternário, e o clima mais seco nesta região parece predominar durante os interglaciais (AULER e SMART, 2001). Wang et al. (2004b) afirmam que os períodos úmidos representam as épocas em que o limite sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) estava sobre o atual semiárido, sendo o principal condicionante atmosférico responsável pelas chuvas.

Os autores explicam que este significativo deslocamento da ZCIT ocorre quando as temperaturas no hemisfério norte são reduzidas, provocando a expansão da cobertura de gelo, com consequente alteração na circulação atmosférica.

Wendt (2015) ao estudar estalagmites em cavernas na bacia do Salitre sustenta a referida hipótese, e associa quatro conhecidos períodos de resfriamento no hemisfério norte (*Heinrich Stadial-HS*: HS1; HS4; HS5; e HS6) a quatro períodos úmidos no semiárido brasileiro: entre 17.055 e 15.640 anos A.P.; entre 40.060 e 39.065 anos A.P.; entre 48.880 e 47.800 anos A.P.; e entre 66.737 e 65.562 anos A.P.

Cristalli (2006) caracterizou fitofósseis em tufos calcários (travertinos) situados também na bacia do rio Salitre, admitindo a existência de mistura de floras entre 21.000 e 9.000 anos A.P., o que parece indicar uma melhor distribuição das chuvas ou aumento nas precipitações anuais para o local nesse período. Vale considerar que, a formação de tufos calcários requer água em abundância, mesmo que sazonalmente, apontando para uma maior pluviosidade do que as registradas atualmente. A autora afirma que na porção norte da Bahia, a caatinga propriamente dita não estava presente no Último Máximo Glacial até o início do Holoceno.

Pesquisa realizada por De Oliveira et al. (1999) produziu dados paleoclimáticos e paleoambientais a partir de análises palinológicas realizadas no vale do rio Icatu na região de dunas fósseis na bacia do São Francisco, semiárido baiano, abarcando um período correspondente a fase final da transição Pleistoceno/Holoceno até os dias atuais. Os autores encontraram, com idade entre 10.990-10.000 anos A.P., pólen de táxons vinculados as atuais florestas amazônica e atlântica, bem como de táxons montanos, sugerindo condições climáticas muito úmidas e temperaturas mais baixas, com tendência progressiva para o árido, que possivelmente atingiu seu clímax entre 6.790 e 6230 A.P. Após esse período há registro do retorno do clima mais úmido até aproximadamente 4.500 anos A.P. quando ocorreu a expansão da caatinga moderna sobre o campo de dunas da Bahia.

Behling et al. (2000) apresentam estudo baseado em testemunhos marinhos (dados de pólen) no litoral do estado do Ceará, indicando a ocorrência de vegetação de caatinga no Nordeste do Brasil durante parte do período do Último Glacial e Holoceno inicial (42.000 - 8500 anos A.P.), refletindo, na maioria das vezes, condições semiáridas, mas durante intervalos considerados curtos (quatro intervalos) foram verificados períodos úmidos, que ocorreram por volta de 40.000, 33.000 e 24.000 anos A.P, com destaque para o intervalo entre 15.500 a 11.800 anos A.P., considerado pelos autores como o período mais úmido do nordeste do Brasil.

Pessenda et al. (2010) afirmam que é possível sugerir a existência de um período com altas taxas de umidade no Pleistoceno tardio e início do Holoceno (~18.000 a 10.000 A.P.) e

um período mais seco (menos úmido) no decorrer do Holoceno no âmbito regional, com significativas influências em diversos pontos do atual semiárido brasileiro.

Outros trabalhos como Dever et al. (1987); Czaplewski e Cartelle (1998); Santos et al. (2012); Nace et al. (2014) também sugerem a existência de oscilações entre períodos mais secos e períodos mais úmidos na região nordeste do Brasil, no final do Pleistoceno e Holoceno. Portanto, parece haver significativa concordância da existência de intervalos mais úmidos durante o Quaternário.

### **6.3. Evolução da paisagem no médio curso do Salitre: evidências nas formas e nos solos**

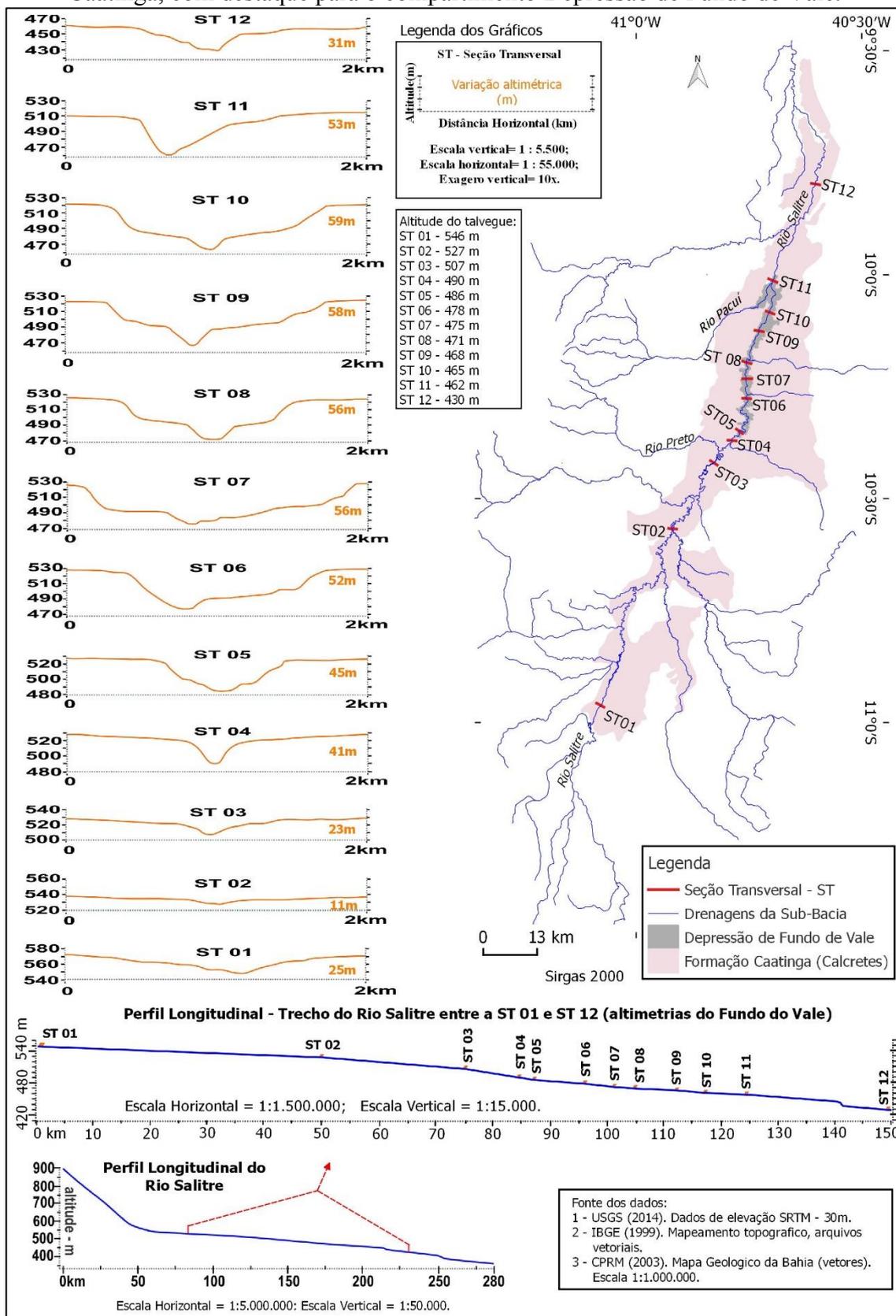
As paisagens apresentam formas e materiais associados tanto a processos atuais, como também à ação de paleoclimas (MELO et al., 2005). Isso faz com que muitas paisagens sejam superposições de distintas condições ambientais comandadas por oscilações climáticas plioquaternárias.

Partindo da ideia de que sobre diferentes condições morfo-pedogenéticas sobrepostas no espaço, seriam controladas por oscilações climáticas que influenciaram decisivamente na flutuação da disponibilidade hídrica, é possível inferir importantes etapas na evolução do compartimento de relevo dfv no médio curso da bacia do Salitre, capaz de explicar o atual estágio em que se encontra a paisagem como parte de um processo evolutivo dentro de um recorte temporal no Quaternário.

#### **6.3.1. A incisão da drenagem na formação da dfv**

O compartimento de relevo denominado depressão de fundo de vale - dfv no médio curso do Salitre é morfologicamente alongado, seguindo o curso sul-norte do rio principal, com amplitude altimétrica que pode chegar a 59 metros (FIGURA 39), entre o platô e o fundo do vale. Esta amplitude se torna mais proeminente (com talvegue mais profundo) a partir da confluência com o rio Preto, que de acordo com Bahia (2017), constitui-se como um dos principais afluentes no médio curso da bacia (comparar as Seções Transversais – ST 3 e 4, FIGURA 39). Ainda analisando as seções transversais, verifica-se redução na amplitude altimétrica a partir da confluência com o rio Pacuí, estando provavelmente associada a redução na espessura dos calcretes da Formação Caatinga.

Figura 39 - Mapa das drenagens da bacia do Salitre, perfis topográficos em seções transversais ao rio principal e perfil longitudinal do rio Salitre em trecho sobre a Formação Caatinga, com destaque para o compartimento Depressão de Fundo de Vale.



Como se trata de uma depressão aberta, seus limites sul (montante) / norte (jusante) são graduais e foram estabelecidos em função da amplitude altimétrica e da relativa abertura do vale. Em campo, próximos ao leito do rio, é possível encontrar pontos com afloramentos de xistos do Complexo Rio Salitre, que em vários trechos constitui embasamento para a Formação Caatinga.

O perfil longitudinal apresentado na Figura 39 (logo abaixo do mapa) está confeccionado totalmente sobre a Formação Caatinga, iniciando a montante, próximo ao contato com os calcários da Formação Salitre e as rochas siliciclásticas da Formação Morro do Chapéu, até próximo ao contato com os filitos e xistos do Complexo Rio Salitre, a jusante. As informações geológicas foram extraídas de Sampaio et al. (1998); Macêdo et al. (2014) e Reis et al. (2018). No perfil é possível apontar que no trecho de 150km há uma amplitude altimétrica de 120m, assumindo um padrão geral com declividade muito baixa (0,08%) e traçado relativamente regular, principalmente entre ST01 e ST11. Há apenas uma pequena variação no traçado entre ST 03 e 04, com declividade de 0,17%, coincidindo com a confluência com o rio Preto e a maior profundidade no entalhamento<sup>11</sup>.

A intersecção com tributários pode gerar mudanças no gradiente dos perfis longitudinais (SEEBER e GORNITZ, 1983; ACKLAS JR., 2003), sobretudo na ausência de controle estrutural e diferenças litológicas. Vale destacar que esta inclinação está apenas no fundo do vale, já que o platô mantém altimetria em torno dos 530m até aproximadamente ST08. Há forte possibilidade que o incremento no fluxo fluvial de matéria e energia pelo afluente rio Preto, principalmente nas fases mais úmidas durante o Quaternário, tenha contribuído no aumento das taxas de incisão neste trecho do rio Salitre.

O contexto geológico-geomorfológico regional deve ser destacado, começando pela configuração da bacia do Salitre, que assume forma de um grande anfiteatro oval, emoldurado por rochas Mesoproterozóicas do Grupo Chapada Diamantina (Formações Morro do Chapéu, Tombador e Bebedouro), constituídas predominantemente por arenitos, que drenam rapidamente as águas pluviais para a área carbonática rebaixada na porção central da bacia. Neste sentido, a área carbonática do Salitre apresenta-se com forte potencial receptor de água, principalmente durante os períodos mais úmidos. Por outro lado, este condicionamento

---

<sup>11</sup> No trecho entre ST11 e ST12 (fora de dfv) há uma anomalia no traçado do perfil, com desnível abrupto de aproximadamente 15 metros, onde localiza-se a Cachoeira do Salitre. Neste ponto há afloramentos de metarenitos da Formação Morro do Chapéu e logo à jusante, no baixo curso da bacia, encontra-se afloramentos de filitos e xistos do Complexo Rio Salitre. Portanto, há neste ponto influência litológica (alta resistência ao processo denudacional dos metarenitos frente aos carbonatos) e estrutural.

geológico e geomorfológico durante as fases semiáridas (altíssima evapotranspiração) pré-dispõe a área ao ressecamento rápido, em função da baixa retenção do fluxo de água nas cabeceiras, favorecendo a extrema intermitência (natureza efêmera) do sistema fluvial.

O processo evolutivo da paisagem no médio curso da bacia do Salitre possui registros das oscilações climáticas nos materiais e nas formas. A própria existência de uma incisão fluvial (dfv) cortando os calcretes do platô carbonático aponta neste sentido. Os calcretes são gerados em ambientes influenciados por climas áridos e semiáridos (WRIGHT e TUCKER, 1991; ALONSO-ZARZA, 2003; ALONSO-ZARZA e WRIGHT, 2010), e as incisões fluviais são associadas a condições com mais umidade do que os ambientes de formação dos calcretes.

A dfv, do ponto de vista morfológico, constitui-se como uma depressão fluvial escavada, que apesar de ser modelada sobre materiais cársticos carbonáticos não exhibe formas típicas do exocarste (poljes e vales cegos, por exemplo) descritas na literatura sobre o assunto (KARMAN, 1994; PILÓ, 2000; GUNN, 2004; FORD e WILLIAMS, 2007).

A dfv teria, assim, sua gênese associada a incisão fluvial sobre os materiais horizontalmente acamados da Formação Caatinga, sendo, portanto, posterior à formação desta (AULER, 1999). A Formação Caatinga possui idade geologicamente recente, situando-se provavelmente no início do Quaternário (SUGUIO et al., 1980; PENHA, 1994; AULER, 1999; BRITO NEVES et al. 2012; BORGES et al. 2016; REIS et al. 2018). É pertinente destacar que não houve eventos tectônicos significativos no Quaternário capazes de gerar episódios de intensa denudação no contexto do Cráton São Francisco (HARMAN et al., 1998; AULER, 1999) e conseqüentemente sobre a Formação Caatinga, embora a possibilidade da contribuição de eventos neotectônicos não possa ser descartada, assim como compensações isostáticas.

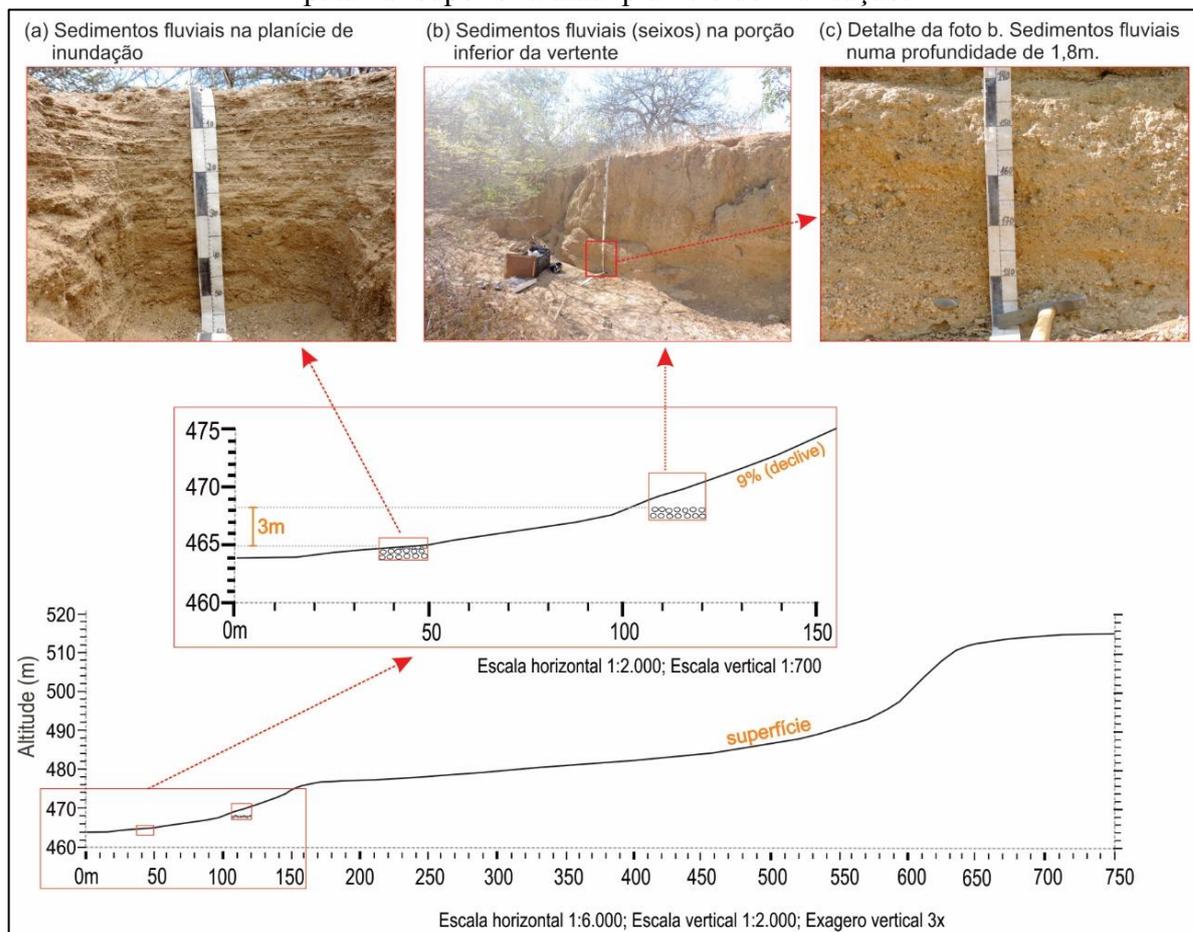
Partindo do pressuposto de que se trata de uma área relativamente estável do ponto de vista tectônico (no recorte temporal Quaternário), há de se reconhecer a contribuição de paleoclimas mais úmidos que o atual, marcantes ao longo do Pleistoceno e Holoceno, capazes de elevar a disponibilidade do fluxo hídrico no trabalho de remoção e transporte de materiais no progressivo processo de entalhamento do talvegue comandado pelo sistema de drenagem.

Wobus et al. (2010), apesar de reconhecer o papel da tectônica na incisão fluvial, afirma que em determinados contextos geológicos as condições climáticas devem ser realçadas, pontuando que aumentos na descarga fluvial resultarão em excesso de energia, com conseqüente aumento na remoção dos sedimentos e da incisão do canal. De acordo com Bogaart et al. (2003) a incisão no rio pode ser causada por mudança climática com aumento na precipitação, seguido do adensamento da cobertura vegetal com redução da erosão do solo nas vertentes, reduzindo a entrada de sedimentos nos canais fluviais, ao mesmo tempo que aumenta

a capacidade de transporte de sedimentos pelo rio. Isso reforça que, no contexto Quaternário da Formação Caatinga e com base em estudos que comprovam a existência de oscilações climáticas regionais, é possível reconhecer no rio Salitre a existência de vazões bem maiores que as atuais, capazes de justificar etapas importantes na gênese da dfv.

Na topossequência analisada foi encontrado indício de sedimentação fluvial em cota altimétrica superior à atual planície de inundação. A Figura 40 destaca materiais em dois pontos no fundo do vale, demonstrando a existência de nível de sedimentos fluviais cobertos por material alóctone na baixa vertente, posicionado 3 metros acima dos sedimentos fluviais na atual planície de inundação. A diferença entre os níveis sugere que houve aumento do entalhamento do canal do rio mediante rebaixamento do talvegue, o que envolveu a migração lateral (para oeste) do leito do Salitre, formando um terraço (TEBBENS et al., 1999) que posteriormente foi soterrado. A discordância entre a inclinação do nível dos sedimentos fluviais em subsuperfície (próximo a 0°) e a declividade da superfície dos solos posicionados acima (9% ou 5,1°), reforça a atuação de distintos processos, quais sejam deposição fluvial no primeiro e trabalho de vertente ocorrido posteriormente.

Figura 40 - Sedimentos fluviais soterrados por colúvios na baixa vertente, encontrados em um patamar superior à atual planície de inundação.



Por fim, cabe destacar a contribuição de algumas variações faciológicas dos calcrites da Formação Caatinga na gênese da dfv. Como visto, toda a depressão está situada sobre esses materiais. Contudo, eles não são homogêneos, e como revelou a própria topossequência de solos estudada, incluem materiais mais duros, outros pulverulentos, mais puros ou com materiais não carbonáticos associados. Fato é que a incisão da drenagem nas fases mais úmidas pode ter exposto faces de calcários freáticos pulverulentos, que por sua menor resistência, alimentaram ainda mais essa incisão.

### 6.3.2. A abertura da dfv sobre condições semiáridas

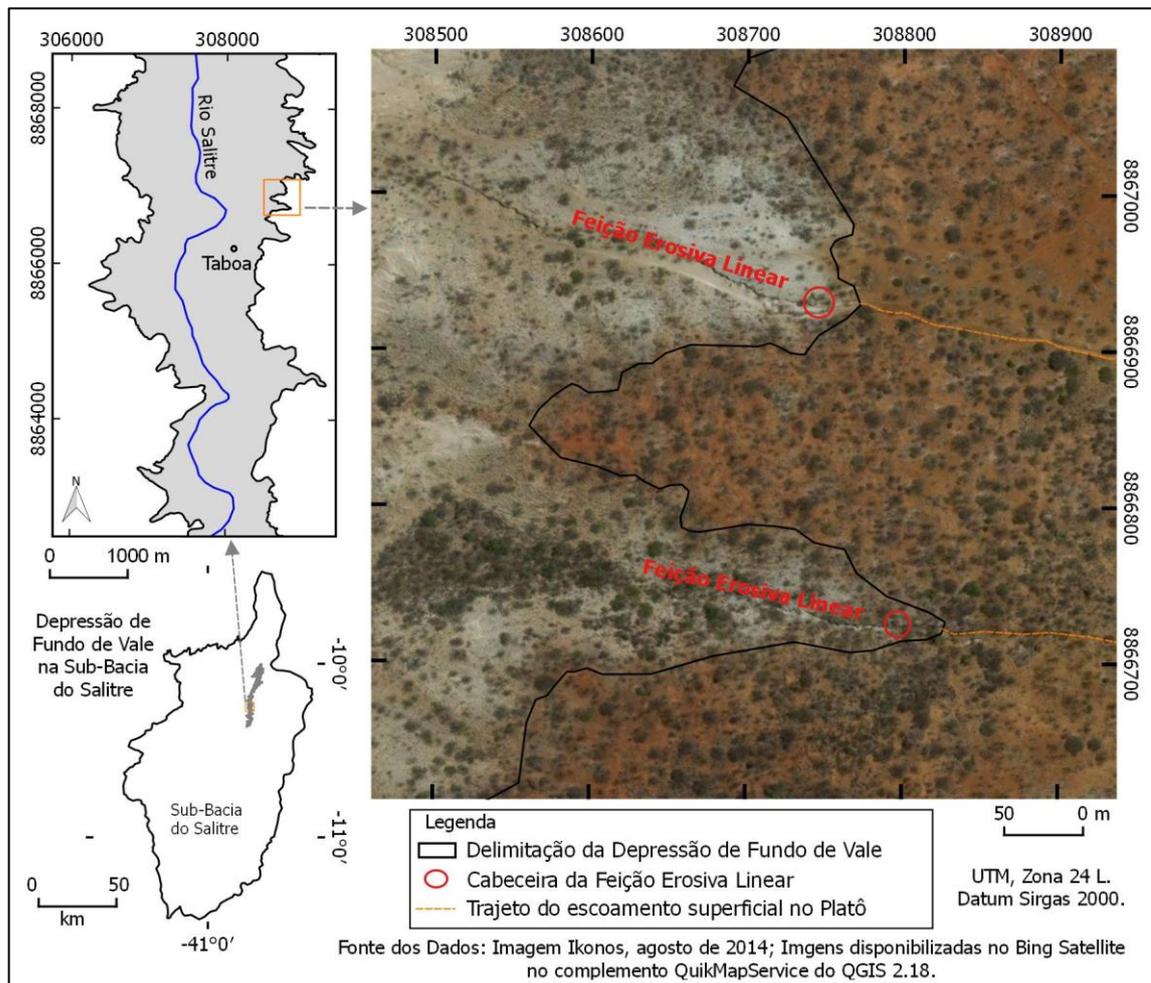
Em fases climáticas mais secas, semelhante às atuais na bacia do rio Salitre, a morfogênese é responsável pela abertura do vale. As vertentes sob climas com déficit hídrico constituem ambiente fortemente instável, e isso se manifesta devido às intensas chuvas que ocorrem em um contexto com grande irregularidade anual na distribuição das precipitações (uma alta taxa de descarga pluvial em curto tempo) associada a uma vegetação mais aberta, que

permite a instalação da erosão como condição morfogenética (TRICART, 1977; BERTRAND, 2004). Sob climas mais áridos, as frentes de intemperismo avançam devagar, de modo que o processo de exumação remove das vertentes, totalmente ou parcialmente, os horizontes pedogenéticos e alteritas (MILLOT, 1977; 1983).

A paisagem atual na dfv pode ser utilizada como exemplo, onde processos físico-mecânicos, característicos de climas semiáridos, ocorrem sob esparsa cobertura vegetal, solos ressecados na maior parte do ano e chuvas concentradas e de grande intensidade, que em conjunto, são capazes de instalar ravinamentos, voçorocamentos e erosão laminar quase que generalizados na paisagem.

A Figura 41 apresenta exemplo da atual expansão do compartimento de relevo dfv, com destaque para avanço remontante das cabeceiras de feições erosivas lineares (círculos vermelhos na figura). Esta dinâmica caracteriza as bordas oeste e leste da dfv, apesar da figura destacar apenas um pequeno trecho. A expansão (reco da vertente) promove reentrâncias nos limites entre a depressão e o platô (ombros da vertente), que adquirem curvaturas côncavas (*head slope*), morfologicamente, de acordo com Schaeztl e Anderson (2005) e Kampf e Curi (2012) capazes de concentrar o escoamento superficial em um eixo principal, geralmente constituídos por uma feição erosiva linear no centro (ravina ou voçoroca), e que se estendem desde o ombro até a confluência com leito fluvial, como nos dois sistemas de cabeceiras apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Exemplo de avanço de duas cabeceiras de feições erosivas lineares sobre o platô carbonático, representando recuo da vertente e expansão da depressão de fundo de vale no médio curso do Salitre.



Entre as duas reentrâncias geradas pelas cabeceiras das feições erosivas há curvaturas convexas na alta vertente (*nose slope*), que constituem morfologias dispersoras de água na encosta. A expansão sobre os platôs nestes locais é menos intensa em comparação com as curvaturas côncavas, mas não menos importante na retração da encosta, haja vista a existência de cicatrizes de movimentos de massa, e inúmeras feições de ravinamentos ramificados em várias direções (também possuem pequenas cabeceiras). Pequenas reentrâncias secundárias são verificadas no trecho do platô que está entre as duas cabeceiras, apontando para uma evolução com tendência ao estreitamento deste trecho, até a incorporação para o interior da depressão (FIGURA 41).

As cabeceiras das feições erosivas estão sendo alimentadas por escoamento superficial proveniente do platô (FIGURA 41), cujo registro pode ser observado a partir de pequenos canais que se projetam por dezenas a centenas de metros do interior do platô em direção às referidas cabeceiras no compartimento dfv. Estes canais constituem microrrelevos suavemente

côncavos (declividade de seções transversais entre 2 e 5%) que concentram água do escoamento superficial das águas pluviais. Vale destacar que no platô a declividade média é inferior a 2%, e os solos são rasos (geralmente inferiores a 50cm) com horizonte petrocálcico na base, capazes de promover significativa redução na drenagem interna do solo. Com isso, durante os eventos de chuva torrenciais típicos de regiões semiáridas, há rápido encharcamento do solo e conseqüentemente o escoamento superficial lento (limitado pela baixa declividade), mas generalizado. Esta condição pedogeomorfológica do platô é capaz de fornecer grande volume hídrico em direção à depressão de fundo de vale, contribuindo na competência dos processos que impulsionam o recuo das vertentes neste compartimento de relevo.

Na média e baixa vertentes também ocorrem forte ação erosiva, como já demonstrado no Capítulo 5, que apontaram a existência de alta densidade de ravinas e voçorocas na dfv. Há também na média e alta vertentes, forte presença de feições erosivas como pedestais e raízes expostas (serão discutidos no capítulo seguinte), que corroboram a atuação não apenas do escoamento superficial concentrado, mas também da erosão gerada por fluxo laminar difuso durante as chuvas torrenciais. Estas informações ratificam a predominância de processos degradacionais na dfv, desde a borda superior da vertente até sua porção inferior.

No canal fluvial, nas condições de semiaridez, ocorre a agradação ou entulhamento, como resposta à maior produção de sedimentos nas vertentes e a menor vazão do rio (VANDENBERGHE, 1995; CANDY e BLACK, 2009; OLIVEIRA, 2010; PELECH, 2016). É uma situação comum, vinculada à dinâmica geomórfica em muitas bacias hidrográficas inseridas no clima semiárido (SAMPAIO, 2013; PACHECO, 2017). A agradação no médio curso do rio Salitre já foi observada por Branner (1911) no início do século passado, período anterior à intensa ocupação na região. Auler (1999) observou 4 metros de sedimentos colmatados sobre antigo leito do Salitre, e afirma que a agradação do rio é muito ativa durante os períodos climáticos mais secos.

Vale ainda destacar que ao longo de um extenso perfil longitudinal de um rio, a resposta para uma mudança climática em termos de sedimentação ou erosão fluvial pode variar, porque diversos aspectos devem ser considerados. Variáveis ambientais específicas, ou condicionantes locais, podem gerar implicações cruciais para o desenvolvimento fluvial (VANDENBERGHE e MADDY, 2001). Em área tectonicamente estável, distante dos efeitos da alteração no nível de base, mudanças generalizadas na atividade fluvial sugerem controles climáticos, mas aspectos como o controle geológico e condições antecedentes da cobertura vegetal e solos nas vertentes precisam ser examinadas (BLUM et al., 1994). Por isso nem sempre o processo de agradação na dinâmica de rios em climas semiáridos ocorrerá pelos mesmos motivos.

No caso específico do médio curso do Salitre, há atualmente pleno predomínio de agradacão de sedimentos, onde a carga de fundo depositada não é removida pela açã fluvial. Neste sentido, é importante acrescentar, que além das especificidades do clima semiárido local, e das dinâmicas degradacionais nas vertentes, há o caráter extremamente intermitente das drenagens em todo médio e parte do alto curso da bacia, que de fato, contribuem decisivamente para o entulhamento natural dos vales.

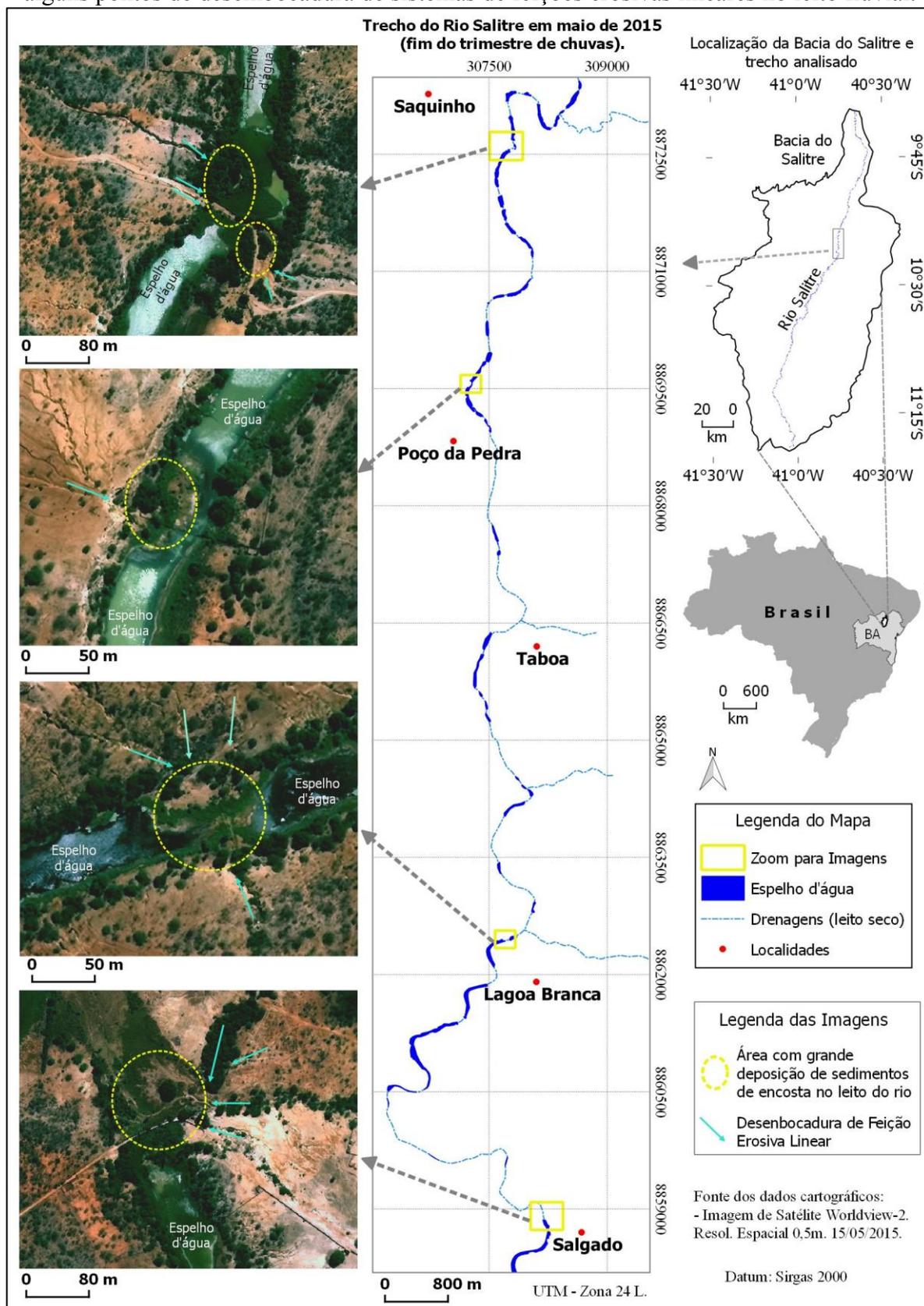
Relatos de moradores da região de Lagoa Branca, Poço da Pedra e Saquinho afirmam ter mais de três décadas sem efetivo escoamento (vazão) do rio Salitre neste trecho. O referido trecho foi monitorado no período entre 2013 e 2020, e de fato o rio não apresentou fluxo hídrico<sup>12</sup>. Os citados relatos corroboram com relatórios apresentados pelo Inema (2008); Medeiros e Gonçalves (2003) e Bahia (2017), apontando que após a construção da barragem de Orolândia/BA (Lat. 10°58'33"S / Long. 41° 5'15"W) no alto curso, houve interrupção do fluxo hídrico superficial intermitente no médio curso do rio (por aproximadamente 100km), restando apenas a contribuição de poucos afluentes efêmeros no trecho a jusante da barragem. Não apenas Orolândia, mas outras barragens foram construídas no alto curso na década de 1980 (MEDEIROS e GONÇALVES, 2003), contribuindo na referida interrupção do fluxo hídrico fluvial. Este fato, com grande contribuição antropogênica, reafirma os processos geomórficos de entulhamento do vale por sedimentos de vertente na dfv no contexto ambiental atual.

A Figura 42 apresenta a condição do rio Salitre (extraída de uma imagem de Worldview-2, com alta resolução espacial), em um trecho do médio curso, no mês de maio de 2015, logo após o período de chuvas na região. Apesar de representar o período mais “chuvoso” do ano, o rio em um trecho de 23 km apresenta apenas pequenos espelhos d’água com ambientes lênticos (manchas em azul no mapa), descontínuos ao longo de todo leito fluvial, separados ou obstruídos por depósitos de sedimentos. Esta intermitência espacial da água no leito do Salitre não é condizente com um comportamento fluvial em período de chuva, mesmo para rios intermitentes do semiárido.

---

<sup>12</sup> A partir da confluência com rio Pacuí (único tributário perene do médio curso) nas imediações da localidade de Abreus, o Salitre passa a ter fluxo hídrico superficial, com vazão média mensal de 0,77 m<sup>3</sup>/s. de acordo com Medeiros e Gonçalves (2003).

Figura 42 - Condição da drenagem do rio Salitre no fim do trimestre mais chuvoso do ano de 2015 em um trecho no médio curso: fluxo hídrico superficial interrompido, com destaque para alguns pontos de desembocadura de sistemas de feições erosivas lineares no leito fluvial.



Algumas das acumulações sedimentares no leito do rio representam leques deposicionais ou cone de dejeção, localizados próximos à desembocadura de feições erosivas lineares, confirmando que foram gerados por ação destas. Os círculos amarelos desenhados sobre as imagens de satélite na Figura 42 representam os depósitos de sedimentos mais proeminentes, e as setas azuis indicam o principal canal erosivo linear (além de outros canais associados) presente nas encostas e conectados ao canal fluvial.

A dinâmica hidrosedimentológica atual no leito fluvial ocorre a partir da expansão destes pequenos “lagos” durante os picos de chuvas e a significativa redução ou desaparecimento nas estiagens anuais. Essa dinâmica, associada a oscilação do nível freático, contribui para significativa agradação gerada pelos processos de vertente.

A formação da paisagem na dfv no médio Salitre se aproxima do modelo preconizado por Bigarella e Andrade (1965); Bigarella et al. (1965), fundamentado em processos morfogenéticos controlados por fases climáticas (distintos padrões de umidade) que se sucedem e oscilaram entre o entalhe da rede de drenagem e a abertura dos vales, ocorridas ao longo do Pleistoceno e Holoceno. Este modelo aponta para respostas geomórficas da paisagem às mudanças climáticas, e devem ser aplicadas com bastante prudência, sem generalidades impostas, cabendo ponderações que devem ser consideradas diante de especificidades locais/regionais e das características das mudanças.

Tucker e Slingerland (1997) estudando o comportamento de bacias hidrográficas frente a mudanças climáticas afirmam que as respostas geomórficas, particularmente em termos de erosão e deposição no fundo do vale, podem não ser lineares, sendo capazes de variar em diferentes partes de uma bacia. Além disso, peculiaridades na mudança nos atributos climáticos, como a distribuição e magnitude das precipitações (não apenas o volume), pode ter implicações decisivas nos processos agradacionais ou degradacionais.

Apesar da confirmação da total predominância a agradação do rio Salitre, em seu médio curso, cabe reconhecer diferenças marcantes no alto curso (com presença anual do fluxo hídrico intermitente) e no baixo curso com drenagem permanente, devido a contribuição do afluente rio Pacuí, única drenagem perene da bacia. Além do mais, há diferenças litológicas, hidrogeológicas e topográficas que apontam para processos fluviais e de vertentes diversificados (atuais e pretéritos), com dinâmica evolutiva provavelmente distinta da que ocorre no compartimento dfv no médio curso.

### 6.3.3. Os colúvios e os solos associados no interior da dfv

Os materiais alóctones recobrimo, principalmente, os terços médio e baixo da vertente foram interpretadas como colúvios. Para Thomas e Thorp (1995) os colúvios constituem registros de ambientes e processos passados, e muitos deles estão geneticamente associados a grandes movimentos de massa. Sua ocorrência depende de elevados volumes de chuvas, geralmente acompanhando de precipitações antecedentes, acima da média, por semanas ou meses. O coluvionamento não estaria associado plenamente a condições climáticas de relativa estabilidade, mas sim a períodos de rápida mudança climática (THOMAS 1994). Romer et al. (2002) analisando perfis de colúvios no terço inferior de uma vertente, no sudeste brasileiro, também associam sua gênese à deslizamentos de terras, indicando a possibilidade da existência de cascalheiras na base de colúvios como resultados de movimentos de massa.

No semiárido brasileiro alguns dos episódios de coluvionamento estariam associados aos períodos de transição durante mudanças climáticas no Quaternário (CORRÊA, 2001; CORRÊA et al., 2008; LIMA et al., 2017; AMORIM, 2015). Depósitos coluviais no semiárido podem representar pulsos de instabilidade, através de movimentos de massa espasmódicos (BEZERRA et al., 2008; GURGEL et al., 2013) capazes de translocar grande quantidade de materiais da alta para as vertentes inferiores. A possível existência de várias mudanças (oscilações) climáticas curtas no último ciclo glacial (VANDENBERGHE e MADDY, 2001) aponta para grande contribuição dos períodos de transição climática, que por sua vez possui significativas implicações na evolução da paisagem.

Sampaio (2013) ao investigar colúvios em bacias hidrográficas no sul da Chapada Diamantina sugere que sua gênese estaria associada aos diversos pulsos de mobilização, transporte e deposição de materiais entre o Pleistoceno médio e o Holoceno médio, e que a maioria dos depósitos estariam associados a episódios de transição entre clima úmido e seco e/ou seco e úmido.

Knox (1972) destaca a grande e rápida instabilidade nas vertentes geradas na transição climática entre o seco e o úmido, frisando que maiores precipitações sobre uma superfície relativamente desprotegida de densa vegetação resultariam em significativo movimento de materiais nas encostas. Mas, para o autor, este processo seria breve devido à rápida resposta da vegetação às mudanças climáticas.

Corrêa et al. (2008) também aponta que episódios de coluvionamento ocorridos em encosta semiáridas no estado do Pernambuco estariam associados à ocorrência de períodos

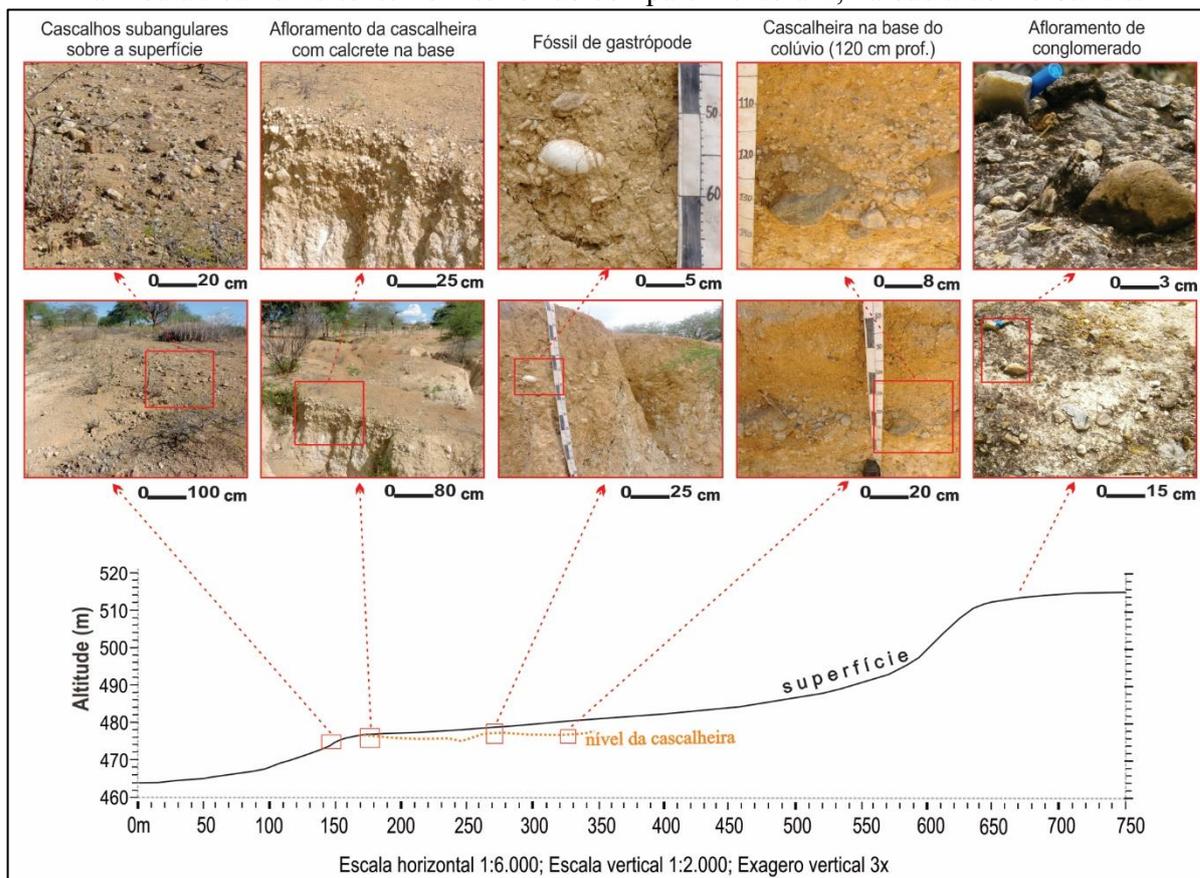
transicionais entre climas mais secos para mais úmidos, mas admite a existência de eventos máximos durante a fases climáticas mais secas.

Bigarella e Mousinho (1965) reconhecem que transições climáticas do úmido para o seco podem ser responsáveis por episódios de coluvionamento, induzidos pela concentração dos volumes pluviométricos (com maiores picos de chuva) sobre cobertura vegetal mais rarefeita. Melo et al., (2005) também apontam para a possibilidade de intenso coluvionamento nas transições do úmido para o seco.

Os colúvios nas vertentes da dfv possivelmente marcam fases de mudança do clima. Wang et al. (2004b) confirmou a existência de pelo menos 11 períodos mais chuvosos na região nos últimos 210.000 A.P. Auler et al. (2004) confirma a existência de três ciclos de umidade nos últimos 23.000 A. P. Neste sentido, há boas referências sobre a existência de oscilações nas condições paleoclimáticas do local, principalmente na pluviosidade, com reflexos no balanço hídrico e na disponibilidade de energia, que altera significativamente a dinâmica das vertentes. É notório que os momentos de transição do úmido para o seco e vice-versa, representam instabilidades capazes de alimentar significativo movimento de materiais nas encostas. Por este ângulo, é provável que os colúvios atuais tenham sido depositados nas últimas fases de transição climática registradas na região, isto é, das úmidas para o seco atual.

Além de todas as evidências físicas, químicas e micromorfológicas apresentadas no Capítulo 4, a presença dos eventos de coluvionamento é marcada pela existência de uma cascalheira na base dos perfis na transição da média para a baixa vertente (FIGURA 43), composta por clastos de rochas siliciclásticas, angulosos, subangulosos e arredondados, com tamanhos variados, desde pequenos cascalhos até calhaus com 20cm. A zona de cascalheira possui espessura irregular, alternando entre 15 e 60 cm. Sua origem pode estar relacionada à degradação de paraconglomerados encontrados em afloramentos na borda do platô, distantes aproximadamente 700 metros do local. O intemperismo sobre os conglomerados ocorre numa condição climática com maior umidade que a atual, capaz de disponibilizar mais água para os processos químicos de dissolução e hidrólise. A transição para o clima seco eventualmente foi responsável pela movimentação dos solos associados aos conglomerados para a média vertente, possivelmente sobre a forma de fluxo de detritos, em um ambiente com cobertura vegetal mais rarefeita e estabelecimento de chuvas torrenciais irregulares.

Figura 43 - Conglomerado na borda do platô carbonático e cascalheira na base dos colúvios na média / baixa vertente no interior do compartimento dfv, na bacia do rio Salitre.



É provável que para a gênese da cascalheira, após os “rápidos” períodos úmidos (Wang et al. 2004b), em um clima mais seco, tenha ocorrido a remoção seletiva dos sedimentos mais finos pela erosão laminar. Os colúvios acima da cascalheira possivelmente representam outros episódios de movimentação de materiais do platô para a média encosta, consubstanciados pelas oscilações nos padrões de umidade nesta região, que não teriam ocorrido apenas uma vez, mas em pulsos e eventos distintos.

A camada de cascalheira é contínua, e o seu nível é discordante com a superfície da encosta, sendo truncada pelos processos denudacionais presentes, exatamente no trecho com mudança brusca na declividade da vertente (FIGURA 43). É válido destacar que a maior acumulação de materiais na média encosta também se justifica pela geometria da própria vertente, que estabelece, no contexto atual, um padrão com declividades inferiores a 5%.

Recobrendo a linha de cascalheira ocorrem colúvios constituídos por sedimentos mais finos, predominantemente arenosos e siltosos, com presença de nódulos carbonáticos distribuídos de forma caótica na massa do solo e sem padrão estratigráfico. Estes nódulos são

litorreliquiais, como demonstrado no Capítulo 4, e estão associados aos calcretes maciços do platô, movimentados para jusante.

Fósseis de gastrópodes terrestres de água doce (FIGURA 43), possivelmente da família *Megalobulidae*, bastante comum em áreas carbonáticas na região da Chapada Diamantina (VIEIRA, 2011) e outros moluscos, foram encontrados enterrados em profundidades que variam entre 50 e 135cm (P3 = 75cm; P4 = 70cm; P5 = 65cm; P8 = 65 e 135cm; e P9 50cm). Dada sua preservação, estes fósseis podem ter como significado a existência ambientes mais úmidos no interior da própria dfv, posteriormente enterrados por colúvios no percurso das oscilações das fases úmidas e secas.

Sobre os colúvios, a pedogênese incipiente não foi capaz de homogeneizar os materiais e descaracterizar as estruturas que denotam os processos sedimentares, nem tampouco formar horizontes pedológicos com estruturas mais evoluídas. Isso leva a crer que essa pedogênese já está relacionada a essa fase mais seca, que perdura até o atual. Eventuais constituintes associados a climas mais úmidos, como minerais de argilas, óxidos e hidróxidos de ferro que atribuem cores vermelhas aos solos, e nódulos ferruginosos anórticos compõem o solo sem necessariamente terem sido gerados no interior da dfv. Podem ser heranças dos solos formados em condição mais úmidas no platô e erodidos para o interior da depressão. Ao contrário, como revelaram os estudos da topossequência, a pedogênese tem atuado na formação de feições associadas aos processos de calcificação e calcretização, inclusive no platô. São elas principalmente os nódulos macios e eflorescências de  $\text{CaCO}_3$ , indicativas de clima semiárido.

A morfodinâmica de vertente no atual contexto ocorre a partir da degradação e remoção dos solos associados aos colúvios, exumando camadas subsuperfícies. A Figura 43 também apresenta exumação de cascalheiras. Portanto, a deposição dos colúvios ocorreram sobre outra condição morfodinâmica, distinta da atual.

Thomas (2004) abordando a dinâmica de paisagens tropicais após mudanças climáticas, aponta que no nordeste da Austrália deslizamentos de terra ocorreram com o aumento nas precipitações no início do Holoceno, no entanto, foi verificado que não houve acoplamento imediato dos detritos gerados no movimento de massa com o sistema fluvial, sendo que, parte destes materiais foram acomodados na vertente. Neste sentido é provável que parte dos materiais depositados nas encostas da dfv estejam, no atual semiárido, sendo conduzidos para a planície de inundação do rio Salitre.

#### 6.3.4. Considerações parciais: o que a paisagem diz?

A paisagem na dfv do médio curso da bacia do rio Salitre revelou diferentes fases evolutivas, até certo ponto opostas, que vão desde a remoção até a agradação dos materiais do leito fluvial, da relativa estabilização das encostas a sua extrema degradação, que, de forma geral, são alimentados principalmente pela forte oscilação da disponibilidade hídrica, e comandadas pela paleoprecipitação e pelas flutuações na dinâmica fluvial. Em síntese, a paisagem e suas feições revelam que:

- A morfologia da depressão de fundo de vale “rasgando” o platô carbonático, representa processo de incisão fluvial com rebaixamento do nível de base, provocados principalmente por fases paleoclimáticas mais úmidas, que dissecaram os calcetes da Formação Caatinga. A existência de terraços em níveis superiores a atual planície de inundação evidencia uma destas fases de entalhamento do leito fluvial. Acrescenta-se que possivelmente os materiais alimentaram a intensidade dos processos, visto que se tratam de calcetes (alta dissolução sob condição úmida), ora fraturados ou nodulares, ora pulverulentos, capazes de acelerar a atividade denudacional.

- A borda do platô significativamente recortada (reentrâncias nos limites entre a depressão e o platô) representa o avanço remontante das cabeceiras das feições erosivas lineares, provocando a destruição dos materiais no ombro da vertente com consequente desestabilização dos solos contidos nestas. Como mecanismo paralelo, há forte presença de ravinamentos e voçorocamentos ao longo de toda encosta na dfv, representado intenso decapeamento, alimentando a abertura da depressão e o entulhamento do leito do rio Salitre. Estes mecanismos atuais representam a dinâmica da paisagem em fases climáticas mais secas, ciclicamente instaladas ao longo do Quaternário.

- Fósseis de gastrópodes, calhaus e cascalhos com formas e tamanho variados, mal selecionadas (com materiais carbonáticos e siliciclásticos), distribuídos de forma caótica na massa do solo, recobrimo nível linear de cascalheira, confirmam a natureza alóctone do material de origem dos solos na vertente. Estes materiais estão sendo atualmente destruídos pelos processos erosivos instalados nas encostas, indicando que não foram depósitos em fases semiáridas ou mais secas, mas possivelmente em fases de transição climática (alta instabilidade) ou mais úmidas, em episódios de coluvionamento, concordando com a evolução da paisagem em outras áreas do semiárido brasileiro.

## **7. O DESENCADEAMENTO DO PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM ÁREAS CARBONÁTICAS NO MÉDIO CURSO DO RIO SALITRE**

### **7.1. Entendendo o contexto teórico sobre o processo de desertificação**

#### **7.1.1. O conceito de desertificação**

A desertificação tem sido apontada por muitos pesquisadores, entidades e governos como um dos mais graves problemas ambientais da atualidade. As áreas em desertificação aumentaram em muitas regiões do planeta nas últimas décadas (HUANG e SIEGERT, 2006), por esse motivo, o fenômeno tem sido bastante estudado nos últimos anos, e embora questionado sobre sua real definição, seu conceito é capaz de trazer para discussão os problemas associados a degradação ambiental presente em espaços dotados de relativa fragilidade, onde a pluviosidade é naturalmente mais restrita.

Há grande quantidade e distintos conceitos acerca do tema desertificação (VERDUM et al., 2001). Nesta tese é discutido o conceito mais divulgado na literatura nacional e internacional. A principal definição atribuída à desertificação foi organizada nos meios diplomáticos, formulada pela Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação – UNCCD e publicada na primeira metade da década de 1990. A convenção entende desertificação como sendo um processo de degradação das terras em regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultantes de vários fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas (UNITED NATIONS, 1994). O mesmo documento esclarece que, degradação das terras refere-se à redução da produtividade biológica ou econômica das terras agrícolas, pastagens e das matas nativas devido aos sistemas de utilização da terra ou a ações que resultem na deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas ou econômicas do solo e a destruição da vegetação por períodos prolongados.

Apesar de algumas ambiguidades e indefinições, diversos são os estudos publicados com o tema desertificação na literatura internacional nos últimos anos que citam a definição construída pela UNCCD, como os trabalhos de Avni (2005), Huang e Siegert (2006), Sivakumar (2007), D’Odorico et al. (2013), Salvati et al. (2015), Khanamani et al. (2017), Christian e Dhinwa (2018), Xu et al. (2019), entre outros. Além desses, há trabalhos desenvolvidos no Brasil, como o Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (BRASIL, 2005), assim como os publicados por Sampaio et al. (2005a), Galindo et al. (2008), Souza et al. (2009), Sá e Angelotti (2010), Souza e Oyama (2011), Perez-Marin et al. (2012), Nascimento (2013), Vieira et al. (2015), CGEE (2016), Alves

et al. (2017), entre outros, que em suas discussões, focadas no semiárido brasileiro, partem da definição da UNCCD.

O fato de a desertificação estar associada ao termo degradação das terras, mesmo especificando para terras secas (regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas<sup>13</sup>), gera significativa generalização de condições e processos que certamente amplia a complexidade conceitual, cabendo melhor delimitar a questão da degradação. Nesse sentido, o termo “degradação extrema” das terras (solo, cobertura vegetal e biodiversidade) com perda da capacidade produtiva (SÁ et al., 2010), denotando avançado, severo ou acentuado estágio de degradação, pode ser utilizado para caracterizar a desertificação. A degradação no contexto da desertificação, também pode estar associada à destruição irreversível do potencial biológico das terras (MAINGUET, 1992), ou o desaparecimento irreversível de algumas espécies vegetais, esgotamento definitivo dos planos de águas superficiais e exacerbação da ação erosiva (ALVES et al., 2009), ou ainda quando a resiliência e a capacidade adaptativa da terra estão comprometidas (BAARTMAN et al., 2007).

Ainda no contexto da possível irreversibilidade do processo de degradação das terras, D'Odorico et al. (2013) afirmam que a desertificação é comumente associada a mudanças que persistem por várias décadas e são presumivelmente permanentes e irreversíveis, pelo menos dentro das escalas de tempo de poucas gerações humanas. Pereira e Nascimento (2013) afirmam que a irreversibilidade deve referir-se a uma situação na qual os custos financeiros da recuperação são maiores que o retorno de uma forma conhecida de uso da terra.

Entretanto, não há consenso envolvendo a definição ou qualificação da degradação das terras para o processo de desertificação. Foi verificado em diversos trabalhos, que a condição está associada a diversos fatores (definidos por determinados indicadores), envolvendo a degradação existente nas chamadas terras secas, mas sem a conotação para determinados níveis ou intensidade.

Em relação a área de ocorrência da desertificação, no texto da UNCCD há referência apenas para zonas climáticas associadas às terras áridas, semiáridas e subúmidas secas, não estabelecendo tamanho mínimo para a área, ou mesmo a escala de observação ou trabalho. Vale ressaltar que, pequenos locais degradados (pontuais) não podem ser vistos como área em desertificação, mas à medida que estas evoluem e se expandem, podem adquirir o respaldo lógico para o referido processo (SAMPAIO et al., 2003).

---

<sup>13</sup> O termo terra seca (*dry land*) é aplicado para uma região com um Índice de Aridez (IA) inferior a 0,65, no qual se enquadram as terras áridas, semiáridas e subúmidas secas. O IA é baseado na razão entre a precipitação e a evapotranspiração de referência (BECERRIL-PIÑA et al., 2015).

O fenômeno da desertificação ocorre em diferentes escalas (NASCIMENTO, 2013), daí diferentes trabalhos realizados sob metodologias bastante distintas são encontrados na literatura, desde trabalhos realizados para grandes áreas em âmbito regional até trabalhos na escala local. Os estudos de cunho regional indicam áreas sensíveis à desertificação e áreas atingidas por este processo, nas quais deveriam ser realizados estudos mais detalhados (abordagens realizadas a partir de variáveis climatológicas e outras utilizando sensoriamento remoto, por exemplo). Na escala local deveriam ser realizadas investigações mais precisas e aprofundadas sobre, por exemplo, aspectos microclimáticos, de degradação de solos, da dinâmica de vegetação, do uso da terra e outros (SALES, 2002).

Outra questão que o conceito da UNCCD abarca diz respeito às causas, apontado para diversos fatores, tanto de ordem natural como induzidos pelas ações humanas. Neste ponto, é importante esclarecer que redução de chuvas ou aumento da temperatura em função de oscilações climáticas, enquanto fenômeno natural (associadas a alterações na atividade solar ou mudança na temperatura dos oceanos, dentre outros), não constitui o que se denomina desertificação. Para este processo, comum nas margens dos grandes desertos, usa-se o termo “desertização” (RUBIO, 1995; MATALLO JÚNIOR, 2009; NASCIMENTO, 2013) ou mesmo o termo “desertificação climática” (CONTI, 1998; MENDONÇA E DANNI-OLIVEIRA, 2007) ou “desertificação natural” (AVNI et al., 2006; ZWEIG et al., 2018).

Para o reconhecimento do fenômeno da desertificação é fundamental a contribuição, direta ou indireta, das atividades humanas. Estudos desenvolvidos em várias partes do planeta, como na Itália (SALVATI et al., 2016), na Índia (DHARUMARAJAN et al., 2016), na Grécia (KARAMESOUTI et al., 2018); na China (HUANG e SIEGERT, 2006); no Irã (SARPARAST et al., 2018); no México (BECERRIL-PIÑA et al., 2015); na África (CAPOZZI et al., 2018); no nordeste do Brasil (VIEIRA et al., 2015) entre outros, condicionam a desertificação às pressões antropogênicas sobre os recursos naturais, verificadas principalmente a partir da retirada predatória e em grande escala da cobertura vegetal e usos inapropriados dos solos. O componente humano assume papel crucial no desencadeamento do referido processo, e é neste sentido que atividades não planejadas e sem controle, como extração de madeira, agropecuária e mineração estão muitas vezes no centro dos estudos dessa temática.

Mas o cerne da questão da desertificação certamente está na complexa interação entre a intensidade no uso das terras e a fragilidade das condições naturais. A desertificação constitui processo desencadeado por múltiplos fatores naturais e antropogênicos (SIVAKUMAR, 2007; D’ODORICO et al., 2013; KARAMESOUTI et al., 2018), por isso, é necessária a avaliação conjunta de parâmetros biofísicas e socioeconômicos que levam à degradação (BAARTAN et

al., 2007; SALVATI e BAJOCCO, 2011). Estudos desenvolvidos na Itália por exemplo, apontam os efeitos sinérgicos dos fatores biofísicos e socioeconômicos (práticas insustentáveis de manejo da terra) como causa da expansão das áreas sensíveis à desertificação (SALVATI et al., 2016).

No semiárido brasileiro, os elementos do meio físico vinculados às características dos solos frente à erosão (SAMPAIO et al., 2005b), extremos climáticos intensos com secas prolongadas de um lado e chuvas intensas e concentradas do outro (MARENGO et al., 2011), além de certas condições morfodinâmicas e hidrológicas (CGEE, 2016), configuram comumente fragilidades e alto potencial de risco a processos de degradação, contribuindo muitas vezes para a ampliação da susceptibilidade à desertificação. Nascimento (2013) afirma que, no semiárido brasileiro, há um quadro geoambiental (água, solo e geobotânica) vulnerável frente à redução da biodiversidade, à erosão dos solos e à diminuição das águas interiores, onde determinados espaços há sinais de profunda degradação ambiental com destaque para a problemática da desertificação.

Vieira et al. (2015), em estudo sobre áreas susceptíveis à desertificação (baixa, moderada e alta), no semiárido brasileiro para o ano de 2010, apontam que 59% da área é classificada como moderada, 35% como alta e apenas 6% com baixa susceptibilidade à desertificação. Para os autores, as atividades humanas (manejo inadequado do solo e ao desmatamento indiscriminado) são o fator dominante para a expansão da degradação no semiárido do nordeste do Brasil.

É nesse sentido que o reconhecimento efetivo de uma área em processo de desertificação depende da geração de uma grande e variada quantidade de dados, necessitando de equipe multidisciplinar especializada, disponibilidade de dados espaciais e temporais e forte trabalho de campo. O fenômeno da desertificação possui característica transdisciplinar (PACHECO et al., 2006) ou multidisciplinar (SÁ e ANGELOTTI, 2009).

Em alguns locais, no semiárido brasileiro, as evidências de uma degradação extrema são tão significativas que eles foram reconhecidos como Núcleos de Desertificação (VASCONCELOS SOBRINHO, 1971; PEREZ-MARIN et al., 2012). Estes constituem áreas onde se verifica grande devastação do bioma caatinga e a exposição dos solos às chuvas intensas, acarretando a intensificação da erosão. Sampaio et al. (2005a) destacam que são áreas com grandes manchas desnudas e sinais claros de erosão do solo. Esses núcleos devem ser considerados como as unidades espaciais mínimas, a partir das quais os estudos sobre o processo de desertificação devem ser conduzidos (MATALLO JÚNIOR, 2001; DOURADO,

2017), permitindo uma abordagem local e uma maior aproximação com o fenômeno (PEREZ-MARIN et al., 2012; LOPES e SOARES, 2016).

No contexto internacional estes núcleos são conhecidos como “*desertification hotspots*” (BAARTMAN et al., 2007; VIEIRA et al., 2015; SALVATI et al., 2016) com exemplos em diversas partes do mundo. Em estudos sobre áreas degradadas no sul da Rússia, Kulik et al. (2013) chamam de “*desertification hotspot*” (pontos críticos de desertificação), os locais com os níveis mais avançado de degradação das terras. Huang e Siegert (2006), em estudo utilizando técnicas de sensoriamento remotos na China e Mongólia, identificam áreas mais ameaçadas pela desertificação, e as chamaram de “*hotspots*” de mudança rápida da cobertura da terra, indicando a necessidade de estudos mais detalhados no local. Portanto, geralmente o termo “*hotspots*”, no contexto da desertificação, está sendo aplicado às áreas identificadas com degradação severa ou extremamente vulnerável à degradação/desertificação (SINGH e AJAI, 2019).

### **7.1.2. Os indicadores de desertificação**

Os estudos sobre desertificação assumem caráter multivariado e complexo, necessitando de indicadores claros e eficientes na determinação da existência e da intensidade do fenômeno, assim como seu monitoramento. A grande quantidade de indicadores definidos e utilizados em diferentes trabalhos, na atualidade, demonstra que não há consenso na comunidade acadêmica/científica ou mesmo no meio político/institucional sobre parâmetros sistematizados que de fato caracterizem o processo de desertificação, seja no Brasil ou no mundo.

Uma coletânea de indicadores foi apresentada por Abraham e Beekman (2006), como síntese do programa de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca na América do Sul, e nesta consta listas com dezenas de indicadores, organizados por entidades governamentais e não-governamentais, pesquisadores e acadêmicos da Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Equador e Peru, e que acabou por influenciar na definição de indicadores apontados no Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – PAN Brasil (BRASIL, 2004) e diversos estudos desenvolvidos no Brasil. O PAN-Brasil, em seu anexo 7, estabelece 47 indicadores de desertificação bastante diversificados, consensuados durante a construção do documento, abordando diversos temas de caráter natural, socioeconômico, institucional, de uso e ocupação, devastação da cobertura vegetal e degradação dos solos, qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, entre outros.

Apesar de reconhecer inúmeras variáveis no processo de desertificação, Matallo Júnior (2001) afirma que os condicionantes climáticos e socioeconômicos não devem ser estabelecidos como indicadores de desertificação, mas sim como “indicadores de situação”. Estes últimos, segundo o autor, auxiliam na caracterização do fenômeno, mas não indicam a desertificação, destacando que do ponto de vista conceitual, a desertificação e os seus indicadores propriamente ditos abrangem diretamente aspectos da degradação do solo, da degradação da biota e da degradação dos recursos hídricos, passível de identificação em nível ambiental.

Para Matallo Júnior (2001), apesar da atuação humana ser fator determinante para a degradação da terra, os indicadores sociais e econômicos podem sofrer interferências macroeconômicas e de ações governamentais que são capazes de modificar a dinâmica da economia local e da renda das famílias, sem reduzir os padrões de exploração e devastação, historicamente instalados na área, reconhecendo que espaços em desertificação podem manter-se simultaneamente com parâmetros socioeconômicos que ostentam tanto índices baixos quanto altos. O referido autor também aponta que os indicadores do clima caracterizam e estabelecem as áreas de risco, mas não devem ser considerados indicadores de desertificação. Verifica-se que o processo de desertificação pode avançar sobre áreas subúmidas, como no núcleo de desertificação Gilbués no Piauí, com chuvas próximas de 900mm (PEREZ-MARIN et al. 2012; SIMPLÍCIO et al. 2020), e não se desencadear um áreas semiáridas significativamente secas.

Os indicadores de situação são importantes na avaliação de riscos/susceptibilidade e na dimensão do problema a ser enfrentado, pois a desertificação coexistindo, por exemplo, com a pobreza profunda e intensa aridez, consubstancia condições mais severas, que amplia a complexidade do processo. É neste sentido que, apesar das diferenças entre estes dois grupos de indicadores (de desertificação e de situação), ambos devem ser considerados, principalmente quando for necessário estabelecer níveis de intensidade ou gravidade.

Diversos trabalhos procuram integrar indicadores e índices utilizando procedimentos estatísticos, sensoriamento remoto e técnicas de análise espacial em Sistemas de Informações Geográficas (SALVATI e BAJOCO, 2011; BECERRIL-PIÑA et al., 2015; CAPOZZI et al., 2018; KARAME SOUTI et al., 2018; SARPARAST et al., 2018; XU et al., 2019). Vieira et al. (2015) utilizam 11 indicadores de susceptibilidade à desertificação, agrupados em duas grandes categorias: I - indicadores socioeconômicos (uso da terra e cobertura do solo; densidade populacional rural; densidade de rebanho pecuário; densidade de ponto de incêndios; unidades conservação; índice de desenvolvimento humano), e II - indicadores físicos (declividade do terreno, geologia, geomorfologia, tipos de solos, e índice de aridez), para estabelecer a susceptibilidade em escala regional para todo território do semiárido brasileiro.

Outros estudos têm como foco parâmetros ou indicadores específicos, como Alves et al. (2017) e Salvati et al. (2008) que utilizam indicadores socioeconômicos, ou Navone et al. (2006); Oliveira (2011); Dharumarajan et al. (2016) com ênfase nos indicadores biofísicos. Khanamani et al. (2017) utilizam indicadores de qualidade do solo (nove índices) para avaliar a desertificação no Irã. Akuja et al. (2001) também utilizam indicadores de qualidade do solo para reforçar o papel da erosão dos solos no desencadeamento da desertificação em Israel. Avni (2005) utiliza dados de erosão por voçorocas como indicador de um processo ativo e contínuo de desertificação, também em Israel.

### **7.1.3. A erosão dos solos como um importante indicador.**

É recorrente, nas discussões sobre desertificação, o destaque à degradação dos solos como característica marcante e fator-chave na compreensão do processo (SALVATI et al., 2015). Nesse sentido, Sá et al. (2010) comentam que, no contexto do semiárido brasileiro, a degradação dos solos é um dos principais condicionantes da desertificação, apontando como fator responsável pela diminuição da qualidade e quantidade da produção de biomassa do solo e redução da capacidade atual e/ou potencial das terras em produzir bens e serviços. A degradação dos solos envolve diversos problemas de ordem física-estrutural e químico-biológica, sendo possível a criação de vários índices que podem avaliar a perda de qualidade, mas é a erosão o aspecto mais visível e marcante na paisagem, sendo o principal indicador de extrema degradação, prejudicando irreversivelmente, de acordo com Chaplot et al. (2005), a fertilidade e a capacidade de retenção de água dos solos. A erosão é a degradação do solo mais irreversível (SAMPAIO et al., 2003).

Sarparast et al. (2018) aplicaram diversos indicadores na região nordeste do Irã, e apontaram que a erosão é o indicador de desertificação mais importante na área estudada. No Brasil, segundo Angelotti et al. (2009), a erosão dos solos é o indicador que tem sido utilizado com maior frequência para avaliar a desertificação. Em estudo apresentado por Matallo Júnior (2001), a erosão dos solos aparece como indicador de desertificação em 6 das 7 listas de indicadores apresentadas pelo autor, expressões como erosão, percentual de solos erodidos, índice de erosão, perda de solo, além de termos que direcionam para a avaliação da degradação dos solos como perda de matéria orgânica, compactação, diminuição da retenção de umidade, salinização, diminuição da fertilidade e presença de crostas no solo.

A ocorrência de sistemas erosivos, a exemplo de ravinamentos e voçorocamentos, são excelentes indicadores de desertificação. Sobre esse assunto, Zweig et al. (2018) afirma que o

desenvolvimento de voçorocas tem impacto direto no potencial agrícola, no solapamento de infraestruturas, na disponibilidade de água, na degradação da biomassa e na escalada da desertificação, sendo assim, o estudo da erosão do solo é um passo vital no combate à desertificação e implementação de estratégias adequadas para conservação do solo.

Avni et al. (2006) reconhecem ravinas e voçorocas como processos geomórficos (morfo genéticos) capazes de conduzir determinados espaços a uma condição de desertificação. Os autores estabelecem que a perda de solo e de biomassa, provocadas pela erosão são evidências (indicadores) da desertificação.

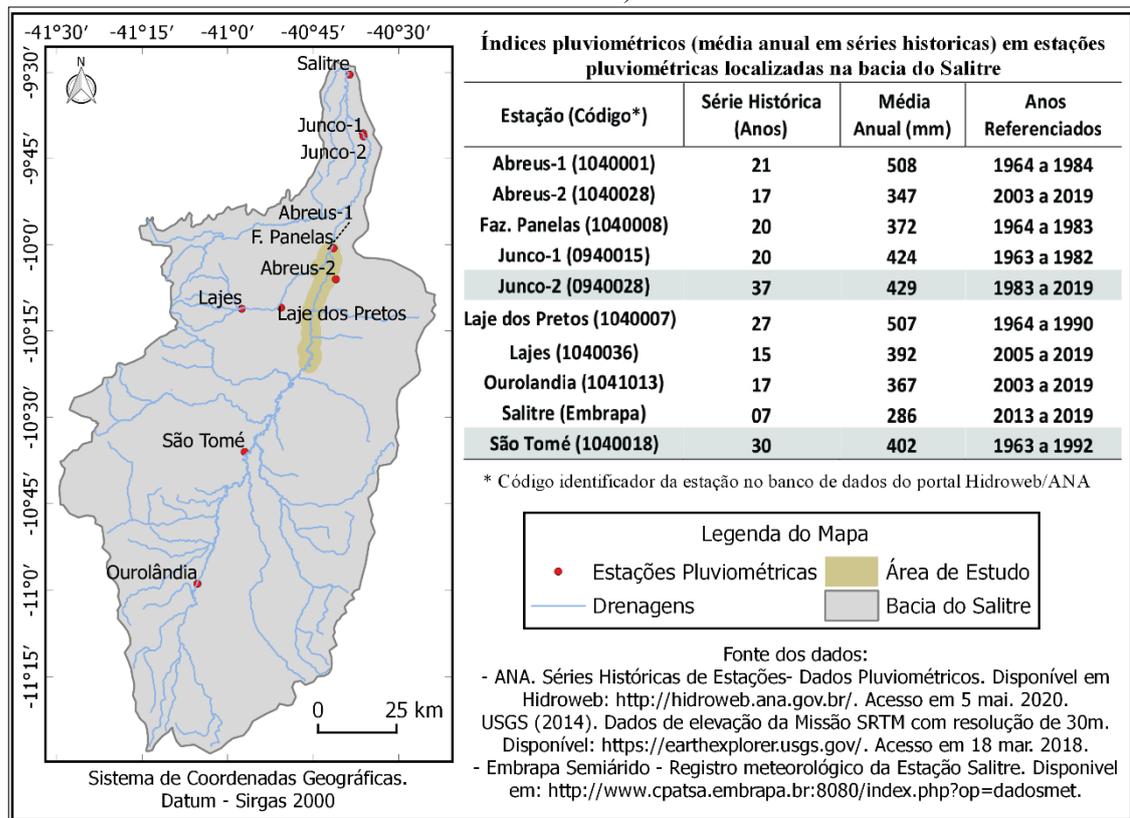
A atividade erosiva linear e areolar, no contexto de algumas áreas do semiárido brasileiro, são reconhecidos por CGEE (2016) como mecanismos atrelados a morfodinâmica, gerados principalmente pelo escoamento superficial das águas das chuvas torrenciais e concentradas que, em áreas instáveis, podem se tornar um fator importante na instalação e expansão da desertificação. Ainda neste sentido, os processos morfodinâmicos, referindo-se a uma condição geomorfológica local e/ou regional, seriam acentuados por usos intensos e desordenados da terra (fator que agrava as instabilidades), promovendo desequilíbrios ecológicos, configurando níveis diferenciados de degradação e contribuindo na expansão dos núcleos iniciais da desertificação.

## **7.2. Desertificação no médio curso do Salitre**

### **7.2.1. O clima local como indicador de situação: característica da pluviosidade e índice de aridez**

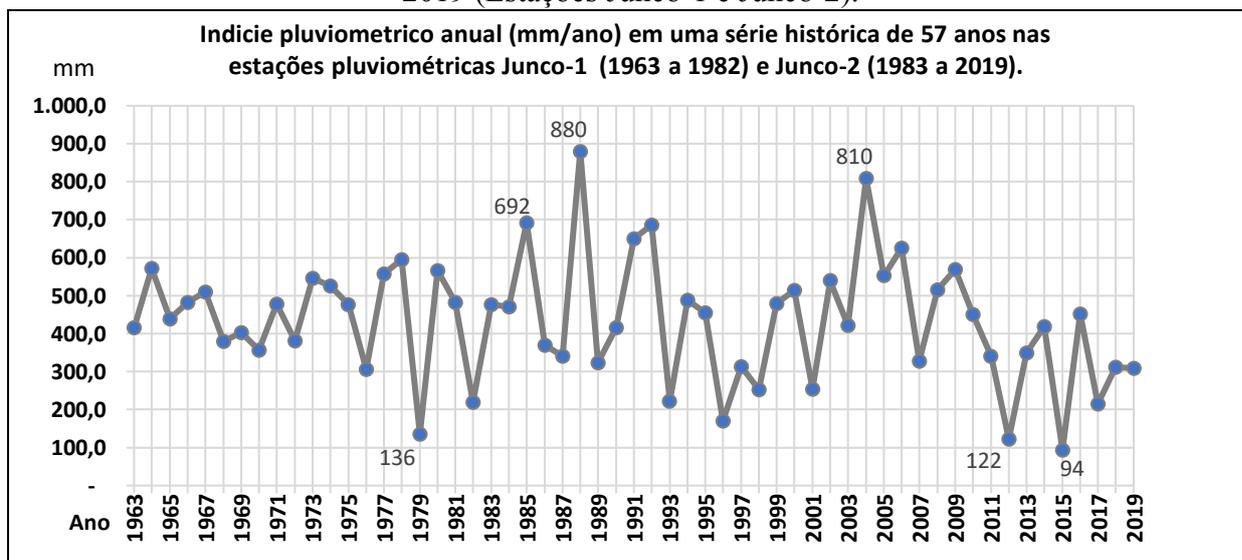
Com foco principal nos médio e baixo cursos do rio Salitre, levantou-se informações sobre a pluviosidade a partir dos dados disponibilizado em 09 estações pluviométricas da Agência Nacional de Água (ANA, 2020) e 01 estação meteorológica da Embrapa Semiárido (EMBRAPA, 2020), contemplando médias anuais no entorno da área de estudo, de acordo com a Figura 44. Das estações apresentadas, apenas 2 cumprem o critério de série histórica igual ou superior a 30 anos com registro de dados, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (OMM, 1989). Nestas, em destaque na tabela da Figura 44, os valores de pluviosidade média variam entre 429 mm (Est. Junco-2) ao norte da área de estudo, e 402 mm (Est. São Tomé) ao sul.

Figura 44 - Estações pluviométricas utilizadas para aquisição de dados pluviiais na área de estudo e entorno. Dados referentes aos índices pluviométricos (médias anuais de séries históricas).



Outra característica pluviométrica nessa região é a forte variabilidade interanual das chuvas, que confere no ambiente alternâncias entre anos (períodos) com pluviosidade significativamente acima da média e anos com chuvas bastante escassas (secas ou estiagens agressivas). A Figura 45 apresenta gráfico com essa forte variabilidade registrada entre os anos de 1963 e 2019, numa série histórica que integrou informações de duas estações pluviométricas na mesma localidade (Junco-1 e Junco-2) destacadas na Figura 8. Há destaque para 1985, 1988 e 2004 com respectivos 692 mm, 880 mm e 8010 mm, como os anos com maiores índices de chuva, e 1979, 2012 e 2015 com respectivos 136 mm, 122 mm e 94 mm, como os anos com forte escassez hídrica. Em relação ao ano mais chuvoso (1988 com 880 mm), o ano de maior estiagem (94 mm em 2015) significou um volume, aproximadamente, 10 vezes menor, imprimindo grande variabilidade pluviométrica interanual e forte amplitude de condições de umidade no ambiente. Vale frisar que nos anos de estiagem o índice pluviométrico anual torna-se compatível com regiões áridas, submetendo o ambiente a uma situação mais extrema do ponto de vista hídrico.

Figura 45 - Variabilidade interanual das chuvas na bacia do Salitre entre os anos de 1963 e 2019 (Estações Junco-1 e Junco-2).

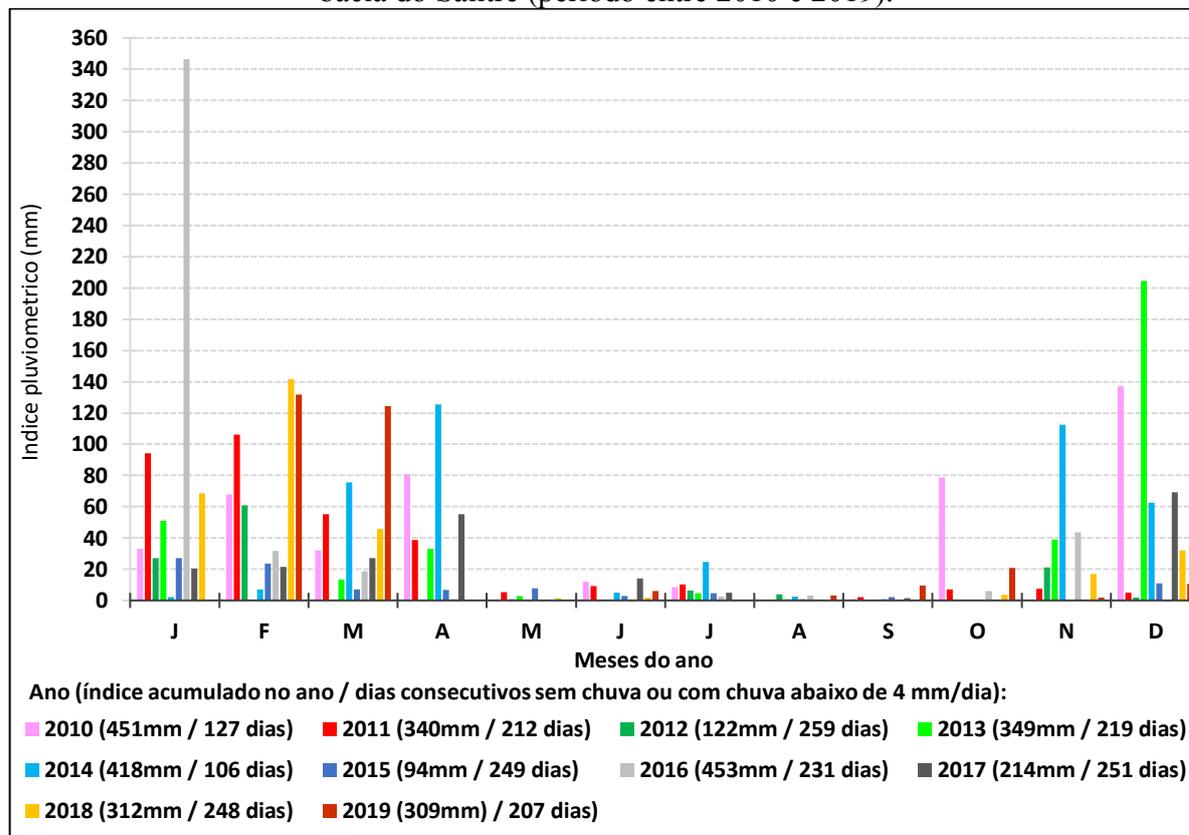


Fonte dos dados: ANA (2020).

Os anos de estiagem representam forte redução na umidade do solo e nos reservatórios, culminado em um significativo déficit hídrico (SILVA et al., 2010) com impactos nos ecossistemas (dinâmica hídrica e na caatinga) e na organização social e econômica da região.

Outra característica marcante é a concentração das chuvas ao longo do ano, com significativa irregularidade em sua distribuição sazonal dentro do ciclo anual, condizente com a maior parte do clima semiárido brasileiro (ARAÚJO et al. 2008). A Figura 46 apresenta gráfico com a variação das precipitações ao longo do ano, em um intervalo de 10 anos (2010 a 2019), numa estação pluviométrica na bacia do Salitre (Estação Junco-2), apontando que a maior parte do volume de chuvas ocorre em apenas um, dois, ou no máximo três meses, notadamente concentrado entre novembro e abril, dependendo do ano analisado.

Figura 46 - Distribuição das chuvas ao longo do ano na estação pluviométrica Junco-2, na bacia do Salitre (período entre 2010 e 2019).

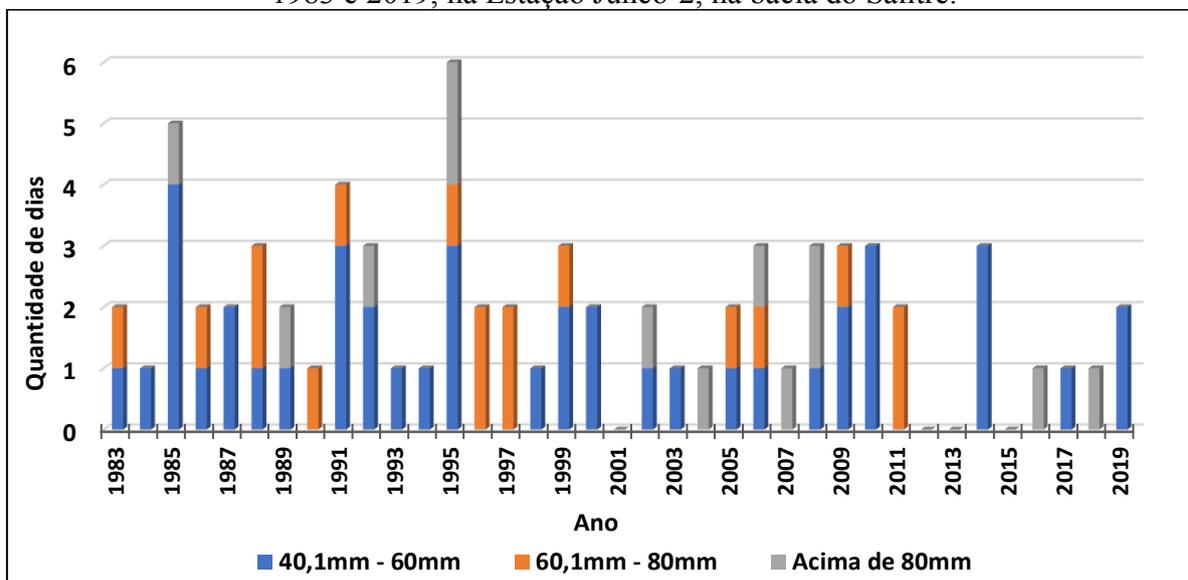


\* Dias consecutivos sem chuva ou com índices pluviométricos inferiores a 4 mm/dia (MENESES et al. 2009).  
Fonte dos dados: ANA, 2020.

Visualizando os dados do gráfico da Figura 46, verifica-se um dos momentos excepcionais de concentração de chuvas, como no ano de 2016, que acumulou índice de 453mm/ano, com 350mm no mês de janeiro, isto é 77% das chuvas concentradas em apenas 1 mês. Por outro lado, a escassez pluvial se estende por aproximadamente 6 meses consecutivos (principalmente entre maio e outubro), no qual o volume acumulado de chuvas é geralmente inferior a 10% do total anual. O gráfico também aponta a quantidade de dias consecutivos com índice zero ou inferior a 4 mm/dia (MENEZES et al., 2009), capaz de representar esta importante condição do semiárido, que é o longo período das estiagens anuais. Neste sentido, é possível verificar que nos anos de 2012, 2015, 2017 e 2018 o período com dias consecutivos sem chuva ou chuva inferior a 4 mm foi de mais de 8 meses, capaz de gerar forte ressecamento dos solos e grandes limitações na produção vegetal.

A grande concentração das chuvas na região do Salitre gera eventos torrenciais, com forte impacto nos sistemas naturais. O gráfico da Figura 47 apresenta a distribuição de dias com chuvas acima de 40mm/dia (aproximadamente 10% do total anual), capaz de revelar estes importantes eventos de chuvas intensas em uma série de 37 anos na Estação Junco-2.

Figura 47 - Gráfico com dias por ano com chuvas acima de 40mm, numa série histórica entre 1983 e 2019, na Estação Junco-2, na bacia do Salitre.



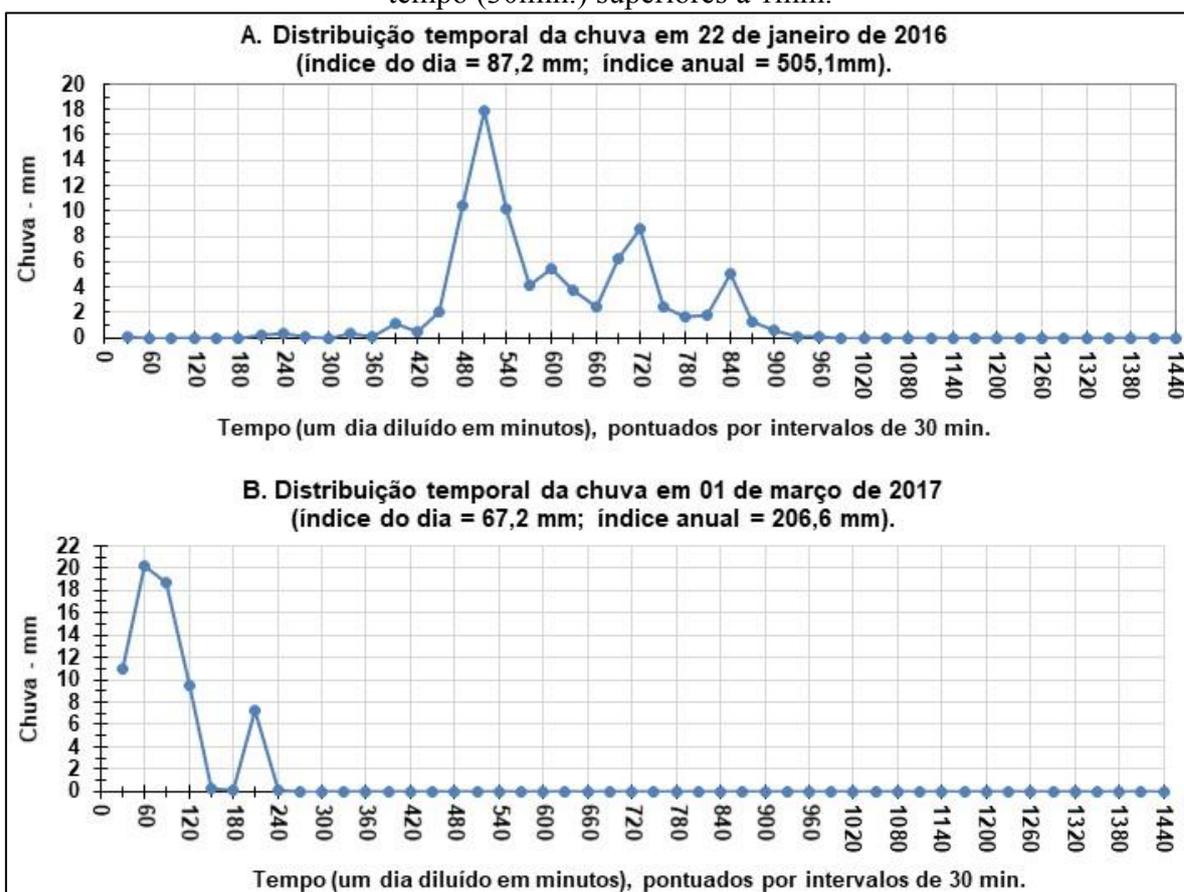
Fonte dos dados: ANA, 2020.

O gráfico da Figura 47 também apresenta a distribuição dos dias com mais de 60mm, ocorrendo em curtos intervalos interanuais, constituindo características deste clima semiárido, além de expor que em 37 anos houve 13 episódios com chuvas acima de 80 mm/dia (alguns ultrapassando 100mm/dia), constituindo um parâmetro potencialmente importante na compreensão sobre a formação e conteúdo da paisagem na bacia do Salitre. Portanto, apesar dos baixos índices pluviométricos e estiagens extremas, tanto sazonais como interanuais, a área de estudo também é afetada por chuvas intensas e volumosas em determinados dias ao longo de toda a série histórica, constituindo uma grande amplitude de condições cíclicas de secas por longos períodos, pontuadas por eventos torrenciais curtos e agressivos.

Esta grande irregularidade também se estabelece quando se observa a distribuição da precipitação pluvial ao longo de um destes dias muito chuvosos. Para esta condição, destacou-se, como exemplo, o dia mais chuvoso de 2016 (22/jan.) e de 2017 (01/mar.) registrados na Estação Agrometeorológica Salitre (EMBRAPA, 2020) representados na Figura 48, que exhibe a distribuição temporal da chuva em cada um dos dias citados, considerando intervalos de 30 minutos (A Estação Salitre é a única com disponibilidade de dados em intervalos de 30 minutos). Os gráficos apontam que em um curto momento, de 120 minutos, ocorre a maior parte da chuva do dia, especificamente (55%) na primeira data e praticamente 90% no segundo dia analisado, representando significativa concentração do volume pluvial diário. O gráfico B (FIGURA 48) chama a atenção para a concentração relativa frente às chuvas anuais, quando se

verifica que em 120 minutos choveu 59,4mm, diante de um índice anual de 206 mm, representando quase 30% de toda chuva no ano.

Figura 48 - Gráficos apresentando distribuição temporal (mm.30min-1) das chuvas em dois dias chuvosos dos anos de 2016 e 2017, registrados na Estação Salitre – Bahia. Os rótulos de dados no interior dos gráficos registram os índices (mm) dentro do intervalo de tempo (30min.) superiores a 1mm.



Fonte dos dados: Estação Agrometeorológica Automática - Salitre (EMBRAPA, 2020).

A Figura 48 apresenta dois eventos torrenciais, com picos de 17,9 mm em um intervalo de 30 min., ou máximo de 28,3 mm em 1 hora, no primeiro gráfico, e 20,2 em 30min ou máximo de 38,9 em 1 hora, no primeiro gráfico, capazes de projetar alta intensidade da precipitação durante o evento chuvoso<sup>14</sup>. De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia, valores acima de 25mm/h caracterizam a precipitação como “chuva forte” (LEITE et al. 2010; MOURA et al. 2013), valor este, destacado também por Hudson (1961); Guerra (2010) como importante limiar para a capacidade da chuva em provocar erosão (erosividade).

Em relação à intensidade média e duração do evento chuvoso, o do gráfico A da Figura 48, por exemplo, aponta que sua duração foi de 420 minutos ou 7 horas (registro de chuvas a

<sup>14</sup> Conceitos sobre evento de chuva, intensidade máxima, intensidade média e picos de intensidade podem ser vistos em Adams et al. (1986).

partir de 1mm), com média próxima de 12mm/h, e intensidade máxima ocorrendo no início do evento. Tokay e Short (1996) apontam que intensidades médias em um evento, entre 10 e 20 mm/h, são classificadas com chuva muito forte, sabendo que intensidades a partir de 10 mm/h durante o evento chuvoso, de acordo com Wischmeier e Smith (1978); Morgan, (1980) já pode ser suficiente para gerar erosão. Na bacia do Salitre estes eventos intensos são raros ao longo dos 12 meses, mas estão presentes praticamente todos os anos, mesmo quando o índice pluviométrico anual é muito baixo, como em 2017 (Gráfico B da Figura 48).

É importante lembrar que as chuvas de alta intensidade tendem a causar maior impacto da gota de chuva no solo com maior escoamento superficial e conseqüentemente maior erosão dos solos, destacando que a maior intensidade dos eventos de precipitação é capaz de projetar elevada erosividade da chuva (GUERRA, 2003; NEARING et al. 2017), que contribui significativamente para alimentar os processos morfodinâmicos instalados sobre as formações superficiais no médio curso do rio Salitre.

A face mais visível da degradação das terras na área estudada é a presença marcante das feições erosivas lineares (Capítulo 5) que são alimentadas principalmente por chuvas intensas e com grande volume de água, que geram significativo escoamento superficial e subsuperficial. Se é fato que as feições erosivas caracterizam o desencadeamento da desertificação no médio Salitre, deve-se reconhecer a importância da irregularidade temporal das chuvas, que submete o ambiente com um extenso período de estiagem anual (com vegetação esparsa e solos bastante ressecadas) às chuvas de alta intensidade, durante o curto período úmido.

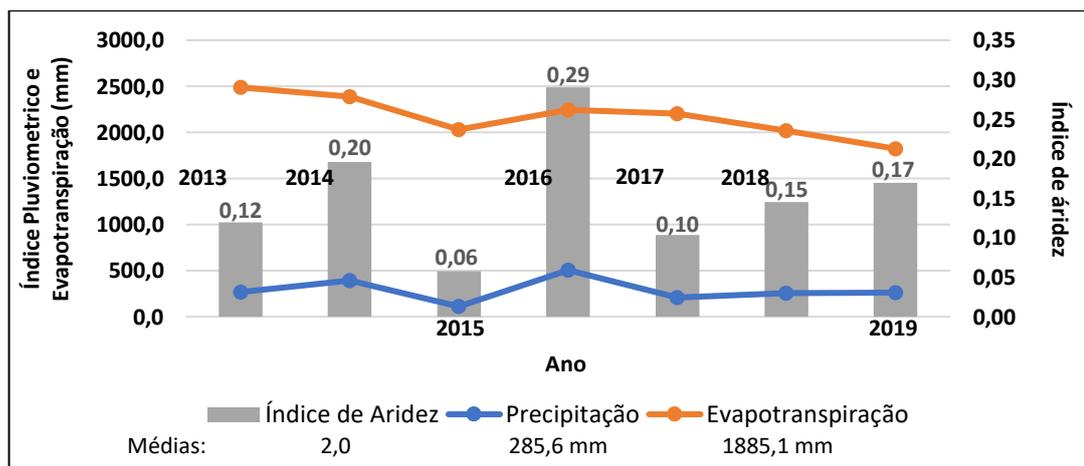
Neste sentido, para as condições instaladas na bacia do Salitre, não apenas o índice deve ser considerado para avaliar o processo de desertificação, mas a irregularidade e o comportamento dos eventos chuvosos, particularmente sua intensidade.

No contexto do semiárido, as chuvas são referenciadas com solução para muitos problemas ambientais, econômicos e sociais, mas no contexto da área de estudo pode representar elemento intensificador da degradação das terras, manifestada pelas incisivas feições erosivas, que reduzem a capacidade produtiva dos solos e a regeneração da caatinga. Portanto, eventos chuvosos concentrados em poucos dias do ano, com curta duração e de elevada intensidade foram identificadas no local, contribuindo para uma situação favorável na consolidação da desertificação em curso.

A região do médio Salitre também possui condições extremas no contexto brasileiro no que se refere ao índice de aridez (IA). O índice de aridez, criado por Thornthwaite em 1941, é a razão entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial, e na sua classificação tem-se: Hiperárido (índice < 0,05); Árido (valores variando de 0,06 a 0,20); Semiárido (0,20 a 0,50);

Subúmido Seco (0,50 a 0,65); Subúmido Úmido (0,65 a 1,0); e Úmido (índice > 1,0) (CGEE, 2016, BRASIL, 2005; LOPES e LEAL, 2015). Santos (2016) calculou o IA em 4 estações meteorológicas no médio Salitre e encontrou valores variando entre 0,25 e 0,36. O Gráfico da Figura 49 apresenta valores de precipitação, evapotranspiração e destaque para o IA na Estação Salitre (EMBRAPA, 2020), apontando para condições extremas no contexto do semiárido, com IA de 0,20, no limite entre o árido e semiárido. Em comparação com a maior parte do semiárido brasileiro, o índice de 0,20 é significativamente baixo (BRASIL, 2005), consubstanciando ambiente muito seco. A Figura 49 exibe a significativa diferença entre a evapotranspiração potencial e a pluviosidade, confirmando a informação no parágrafo anterior, capaz de gerar déficit hídrico em praticamente todos os meses do ano, ao longo dos sete anos analisados, exceto nos poucos dias com chuvas mais volumosas.

Figura 49 - Precipitação, evapotranspiração e índice de aridez na Estação Salitre - Bahia (2013 a 2019).



Fonte dos dados: EMBRAPA (2020).

O índice de aridez é também utilizado como um importante parâmetro para o estabelecimento de áreas vulneráveis à desertificação, sabendo que quanto menor o valor IA, têm-se uma elevação tendência a desertificação (LOPES e LEAL, 2015; SPINONI et al., 2015), devido a “baixa” pluviosidade frente a uma “alta” evapotranspiração potencial. O IA foi utilizado como critério delimitador das Áreas Suscetíveis à Desertificação - ASD estabelecidos no território brasileiro (BRASIL, 2007).

Portanto, tanto o índice de aridez como o índice pluviométrico a as características das chuvas, apesar de não constituírem manifestações da desertificação, são cruciais para apontar áreas onde o processo pode se instalar diante de alterações nas condições vegetacionais,

pedológicas e hidrográficas. Ao mesmo tempo, reverter perda de biodiversidade/cobertura vegetal e recuperar fontes hídricas são mais complexos em circunstâncias com baixos índices pluviométricos e de aridez, assim como, controlar erosão em uma paisagem com longas estiagens anuais e chuvas torrenciais, é também bastante desafiador.

### **7.2.2. Condição socioeconômica (renda e analfabetismo) no médio curso da bacia do rio Salitre no Município de Campo Formoso: pobreza e degradação das terras**

Analisar as variáveis socioeconômicas da população no médio curso da bacia do rio Salitre é fundamental na compreensão das causas que desencadearam ou aceleraram a degradação das terras, e no dimensionamento dos impactos negativos que estão ocorrendo e/ou poderão ocorrer. A confirmação de altos níveis de pobreza contribui na elucidação de possíveis fatores motivadores do desmatamento da caatinga e manejos inapropriados do solo, fato este, que não pode ser negligenciado. Isso quer dizer que a busca pelas condições mínimas de sobrevivência de uma comunidade, aliado ao abandono político, constitui fator motivador de uma ocupação predatória. Wilson et al. (2016) afirmam que a degradação da terra é um fenômeno passível de reversibilidade, mas se alguns dos elementos causadores (entre eles o de caráter socioeconômico) forem deixados sem controle, a deterioração do ambiente aumenta, levando ao estado irreversível de desertificação e à intensificação da perda dos serviços ecossistêmicos.

É neste sentido que é relevante confirmar e registrar os números negativos de dois parâmetros socioeconômicos: analfabetismo e renda, que juntos são capazes de sintetizar as baixas condições de vida da população, componentes de uma paisagem visivelmente degradada, tanto do ponto de vista biofísico, como social.

Para verificar a renda e o analfabetismo da população na área da dfv e entorno, buscou-se informações dos setores censitários (IBGE, 2010), constituído um diagnóstico social mais fiel da condição local, que é bastante distinta dos dados generalizados para o município de Campo Formoso. Foram quatro setores, que juntos representam apenas 3% da população do município e 16% do território. A população em 2010 dos citados setores era de 2.059 habitantes, com densidade demográfica de 2 hab./km<sup>2</sup>.

Um importante parâmetro utilizado nos estudos sobre desertificação é a taxa de analfabetismo. De acordo com IBGE (2010), esta taxa é construída apenas pelo grupo populacional com 15 anos ou mais de idade. A taxa de analfabetismo local reflete as condições sociais do meio rural na área do médio curso da bacia do rio Salitre, sendo que em 2010 foi

registrada taxa de 32,5%, valor muito alto frente aos já considerados altos do Brasil (9,6%), do estado da Bahia (16,6%) e do próprio município de Campo Formoso (24,6%) (IBGE, 2010). Mesmo se for considerado a taxa de analfabetismo rural (apenas pessoas que residem na zona rural), a taxa na área de estudo é superior ao município de Campo Formoso (28%) e da média do semiárido brasileiro (30,5%) INSA (2020a).

INSA (2020a) afirma que quanto maior a taxa de analfabetismo, maior a contribuição para a desertificação, e BRASIL (2004) justifica que estas taxas elevadas representam entraves para o desenvolvimento de políticas efetivas de combate ao referido processo. De fato, há o reconhecendo de que altas taxas de analfabetismo gera uma condição de desigualdade de acesso às oportunidades e limitações nas possibilidades de desenvolvimento.

É neste sentido que Alves et al. (2017) em trabalho sobre a importância de indicadores socioeconômicos nos estudos sobre desertificação, afirma que a taxa de analfabetismo pode expressar o quanto uma população pode compreender sobre a importância de ações de preservação ambiental e uso racional das terras. A avaliação sobre a questão educacional, representada pelo nível de escolaridade ou pela taxa de analfabetismo, constitui, enquanto carência social, um dos problemas socioeconômicos característicos de áreas em processo de desertificação no semiárido brasileiro, compondo importantes índices utilizados na avaliação de riscos à desertificação.

O componente renda é considerado um dos mais importantes medidores de pobreza (KAGEYAMA e HOFFMANN, 2006), e foi analisado neste trabalho a partir de critério adotado pelo IBGE (FIGURA 50), que agrupou percentuais da população com mais de 10 anos de idade em distintas faixas de renda mensal, bem como percentuais de domicílios por renda mensal domiciliar *per capita*, sendo o primeiro grupo de dados analisados no gráfico A e o segundo no gráfico B da Figura 50. Os gráficos fazem comparação entre o entorno do rio Salitre, em seu médio curso no município de Campo Formoso, e o próprio município de Campo Formoso. Vale salientar que o referido município já possui indicadores sociais insatisfatórios, como o IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal) considerado “baixo”, com valor de 0,586, de acordo com PNUD (2013), na mesma faixa da maior parte (60%) dos municípios do semiárido brasileiro (INSA, 2020b). O gráfico A aponta que nas 2 primeiras faixas (sem rendimento e rendimento até  $\frac{1}{2}$  salário), onde a baixa renda está instalada, os valores dos setores censitários do Salitre são superiores ao município de Campo Formoso, 74,3% e 64,5% respectivamente, sugerindo condição de pobreza mais elevada. O percentual do Salitre nestas faixas de renda está próximo dos municípios mais pobres do semiárido baiano, que estão em torno de 80% (BAHIA, 2014). Já em todas as faixas de renda acima de um salário-mínimo, os percentuais para o

entorno do rio Salitre são insignificantes, e no município de Campo Formoso, apesar de reduzindo, são superiores, com presença de indivíduos em todas as faixas de renda.

Figura 50 - Faixas de rendimento mensal (salário-mínimo) na comparação entre o entorno do rio Salitre e o Município de Campo Formoso/BA.

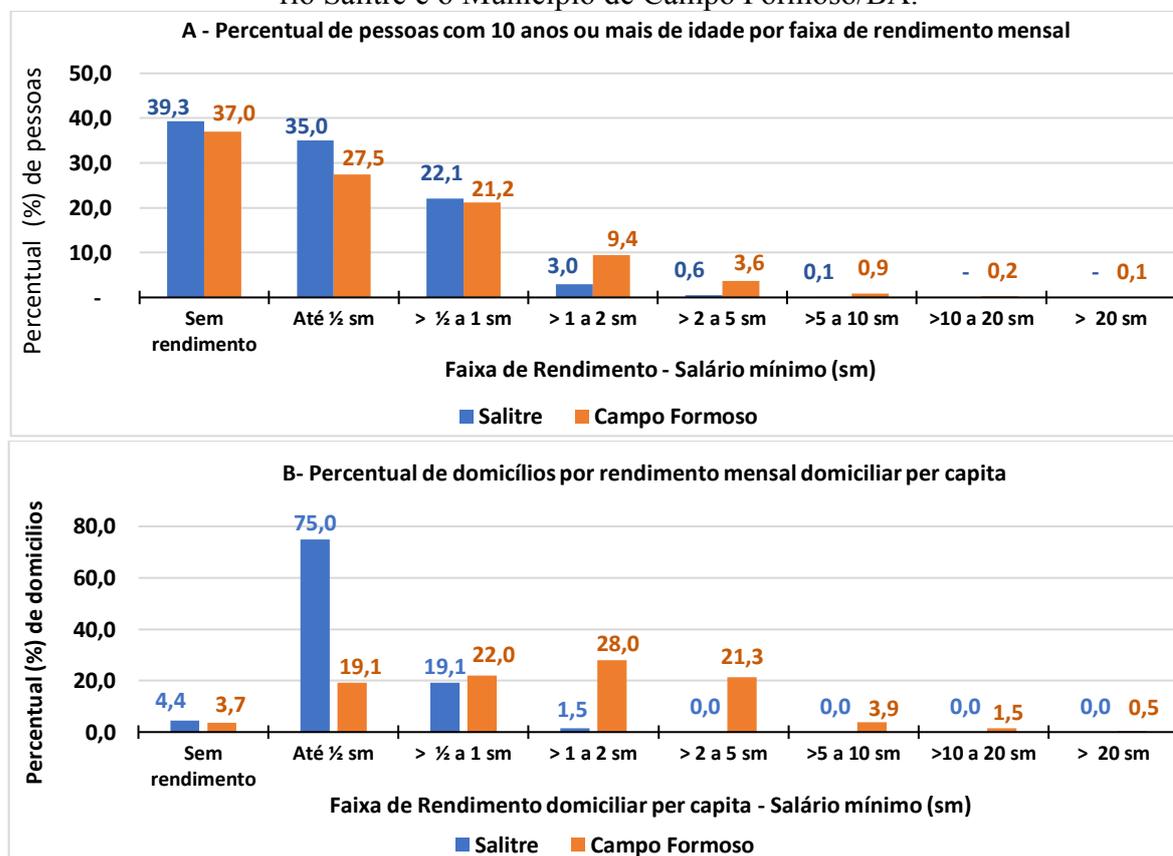


Gráfico A - Percentual de pessoas com 10 anos ou mais de idade. Gráfico B – Percentual de domicílios por rendimento mensal domiciliar per capita. Fonte dos dados: IBGE (2010).

O gráfico B traduz melhor a situação de pobreza na área de estudo, quando aponta que 75% dos domicílios possuem renda domiciliar per capita de até ½ salário-mínimo. Nesta mesma faixa de renda, Campo Formoso apresenta 19,1%, com uma melhor distribuição do percentual de domicílios nas faixas de renda. Hoffmann (2008) aponta a existência de alta insegurança alimentar associada às faixas de renda mensal de “até ½ salário” (rendimento domiciliar per capita), o que confirma a condição de pobreza atrelada à parcela da população com este nível de renda.

A baixa renda da população se materializa na paisagem, permeando desde a infraestrutura das moradias até as instalações para o uso econômico da terra (FIGURA 51), que apresenta aspecto geral de algumas residências na comunidade de Poço da Pedra no município de Campo

Formoso, em meio à espaços morfodinamicamente instáveis, com forte exposição de solos e baixa cobertura de caatinga, além de marcas de ravinas e cicatrizes de movimentos de massa.

Figura 51 - Fotos da localidade de Poço da Pedra no Município de Campo Formoso - BA.



A – Paisagem com marcas de erosão linear e movimentos de massa ao fundo, e em primeiro plano é apresentado aspecto geral de curral improvisado para caprinos e ovinos. B – Paisagem com alta exposição de solos e caatinga hiperxerófila bastante alterada ao fundo, com habitações precárias e baixa infraestrutura na porção central da fotografia.

As paisagens apresentam objetos fundamentalmente artificiais e objetos que se aproximam mais do natural, mesmo com significativos aspectos de movimentos e alterações bruscas no ambiente. Ao entender que os objetos materializados em uma paisagem se interrelacionam (SANTOS, 1997), é condizente inferir sobre a existência de relações degradacionais que se retroalimentam, pois os indivíduos do contexto social apresentado na Figura 51 produzem currais de madeira, usam lenha, utilizam pastos naturais (sobrepastejo), entre outros, a partir dos recursos naturais do local e entorno, que já estão bastante alterados e exauridos, contribuindo para aceleração da degradação das terras. As alterações induzidas favorecem a perda dos solos, da produção de biomassa e dos já escassos recursos hídricos. Por

outro, em um contexto rural significativamente pobre e excluído de políticas públicas favoráveis, quanto mais escassos os recursos naturais, maior será a degradação social gerada pela crescente limitação do ambiente. Este ciclo de pobreza e degradação das terras é bastante complexo e precisa ser investigado em profundidade, mas, o fato é que sua manutenção amplia os riscos de desertificação (WINSLOW et al. 2004).

Não se deve menosprezar aspectos associados a pobreza no meio rural como condicionantes que contribuem para o avanço da desertificação no Brasil, principalmente em ambientes já fragilizados e com a população confinada em pequenas parcelas de terra (BRASIL, 2004). No contexto de ambientes frágeis e com relativo estágio de degradação, a condição social de pobreza pode aumentar a pressão sobre os ecossistemas locais, uma vez que a busca pela sobrevivência situa as comunidades diante da necessidade de extrair cada vez mais os recursos naturais disponíveis e ocupar terras impróprias para agricultura, mesmo diante da ameaça de esgotamento. Caetano et al. (2017) menciona que a pobreza rural potencializa o mau uso dos recursos, e muitas vezes, apenas encontra como única saída a excessiva retirada da cobertura vegetal, além de práticas agropecuárias predatórias (queimadas, pecuária extensiva, lavoura itinerante com reduzido tempo de pousio, entre outras) que suscitam o uso inadequado do solo. Cao et al., (2018) segue este mesmo pensamento e reforça que a desertificação e a pobreza estão interligadas e afetam simultaneamente as comunidades que vivem nestas áreas, destacando contextos espaciais no Oriente Médio, na África e na China.

É sempre válido salientar que a pobreza é alimentada por uma complexa conjuntura política e econômica, e que nos espaços em desertificação, a pobreza também será agravada pela redução da qualidade e quantidade dos recursos na região. A afirmação da pobreza como uma das causas da desertificação não nega que atividades lucrativas com alto padrão de consumo e crescimento econômico, associadas a uma ocupação exploratória e irregular também contribuem para o processo. Mas, no contexto espacial analisado neste trabalho, foi a condição de pobreza que se constituiu como uma das principais características do local. Neste sentido, considera-se a assertiva de Wilson et al. (2016), que, apesar de reconhecer a degradação da terra como um fenômeno multiescalar e dinâmico, admite a necessidade da primeira análise do fenômeno partir do nível local, para depois abordar outras escalas.

A confirmação da existência de condições graves de pobreza associado a questões pedogeomorfológicas, bioclimáticas e de uso, auxiliam no reconhecimento de uma área em desertificação no médio curso do rio Salitre, superando indicações de vulnerabilidade moderada a alta ou susceptibilidade acentuada, geradas por investigações em escala regional, apontada em Sá e Angelotti (2009); Bahia (2014); Bahia (2017); Dourado (2017), entre outros. Santos

(2016) utilizando análise geoambiental integrada, indicadores-chaves de situação e desertificação para o município de Campo Formoso, e a aplicação de Modelo DPSIR (Força Motriz/Pressão/Estado/Impacto/Resposta), afirma que já está instalada no médio curso do Salitre um processo de desertificação.

### **7.2.3. Ocupação das vertentes no médio curso da bacia do rio Salitre: atividades econômicas implantadas**

#### **7.2.3.1 A formação espacial e o contexto histórico, uma síntese**

Os primeiros registros sobre a chegada dos colonizadores portugueses na bacia do rio Salitre apontam para o final do século XVI, conduzidas por expedições em busca de minérios e indígenas para mão-de-obra escrava, mas a ocupação efetiva ocorreu a partir do século XVII com o estabelecimento de currais para implantação da pecuária, em contexto semelhante à ocupação do submédio São Francisco (DOURADO, 2015).

Ainda no século XVII, parte do curso do rio Salitre serviu de rota para rebanhos que se deslocavam do sub-medio São Francisco e posteriormente do Piauí até Salvador (GONÇALVES, 1997). Neste mesmo período houve também a exploração do salitre (nitrato de potássio, muito utilizado na época para fabricação de pólvora) que existia em grande quantidade na região, tendo sua exploração ocorrida até início do século XVIII (PESSOA, 2003; SANTOS, 2011). Após este período persistiram grandes fazendas que desenvolviam atividades consorciadas entre a criação de gado e atividades agrícolas, a primeira nas terras de sequeiro afastadas do rio, e a segunda, nas margens do rio Salitre (DOURADO, 2015). Acrescenta-se que o uso da lenha como principal fonte de energia e combustível, também tenha contribuído no desflorestamento inicial da caatinga naquela região.

Neste sentido destaca-se que a exploração mineral e a agropecuária foram as atividades econômicas que mais contribuíram na formação espacial no território da bacia hidrográfica do Salitre, sendo pertinente que determinadas análises sobre instabilidade e/ou degradação ambiental no local, considere, direta ou indiretamente, as possíveis alterações promovidas pelas citadas atividades.

A dinâmica de ocupação do Salitre teve significativa mudança no século XX com a introdução da agricultura irrigada no baixo curso, no município de Juazeiro, e o plantio de sisal (*Agave Sisalana*) no médio curso no município de Campo Formoso, este último, abarcando a área de estudo proposta neste trabalho e seu entorno.

Portanto, o foco aqui será no médio curso, enfatizando as duas atividades econômicas com maior presença espacial, envolvendo o cultivo do sisal, como principal atividade, além da pecuária de ruminantes de médio porte como caprinos e ovinos.

### **7.2.3.2 Principais atividades econômicas implantadas**

Para melhor compreender a exposição dos solos é pertinente apresentar as atividades econômicas responsáveis pela remoção da cobertura vegetal. As três principais atividades implantadas (com significativa capacidade de alteração da paisagem) correspondem ao monocultivo do sisal, pecuária de ruminantes de médio porte como caprinos e ovinos e, nos últimos anos, a agricultura irrigada. Outros trabalhos também apontam a presença marcante destas atividades no médio curso do rio Salitre (SANTOS, 2016; BAHIA, 2017).

No contexto da bacia hidrográfica do rio Salitre, o sisal representa 97,8% dos cultivos permanentes plantados (BAHIA, 2017). É importante destacar também que Campo Formoso é o maior produtor de sisal do Brasil, representando atualmente em torno de 30% de toda área ocupada por sisal no estado da Bahia (IBGE, 2020). Na Bahia, no final da década de 1940, existia aproximadamente 300 hectares de sisal cultivados, e no ano de 1970 a área plantada se aproximou dos 270.000 ha (SANTOS e SILVA, 2017). O cultivo e expansão ocorreu na bacia do Salitre a partir da década de 1950 (ACIACF, 2019), mas acelerou principalmente a partir das décadas seguintes (NASCIMENTO, 2008),

O agave se adaptou perfeitamente ao clima seco, sendo este o principal fator para seu sucesso na região. Com presença marcante desde a década de 1960, tornou-se um importante agente modificador da paisagem, principalmente na retirada da caatinga, com impactos diretos na biodiversidade e na exposição dos solos aos processos erosivos (FIGURA 52 – A, B, C). O plantio do agave não representa, necessariamente, condicionante para a degradação das terras, mas sim, sua forma de apropriação das terras e manejo, baseados em grandes áreas destinadas apenas para este tipo de cultivo (monocultivo), com a derrubada e queima da caatinga. Para combater a proliferação de fungos, a queimada é utilizada na substituição de antigos plantios de agave contaminados (Foto c – FIGURA 52).

Figura 52 - Áreas utilizadas para o cultivo de sisal em fazendas localizadas nas proximidades da estrada entre as comunidades de Poço da Pedra e Lagoa do Porco, no município de Campo Formoso-BA.

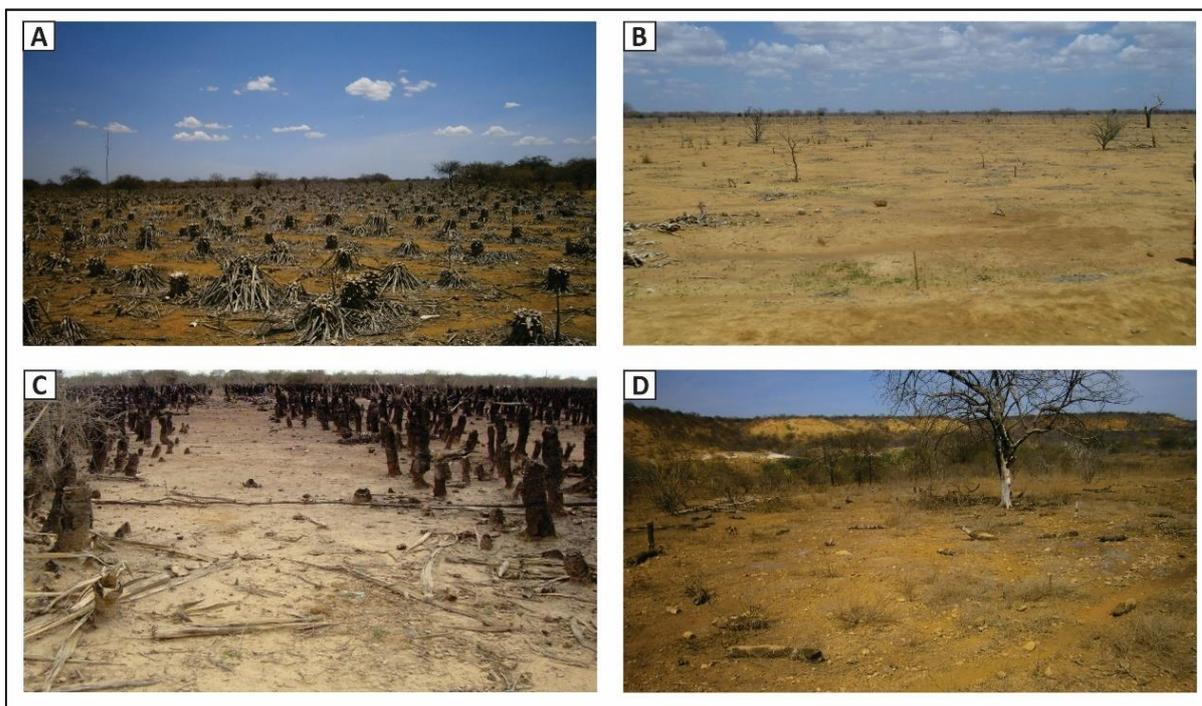
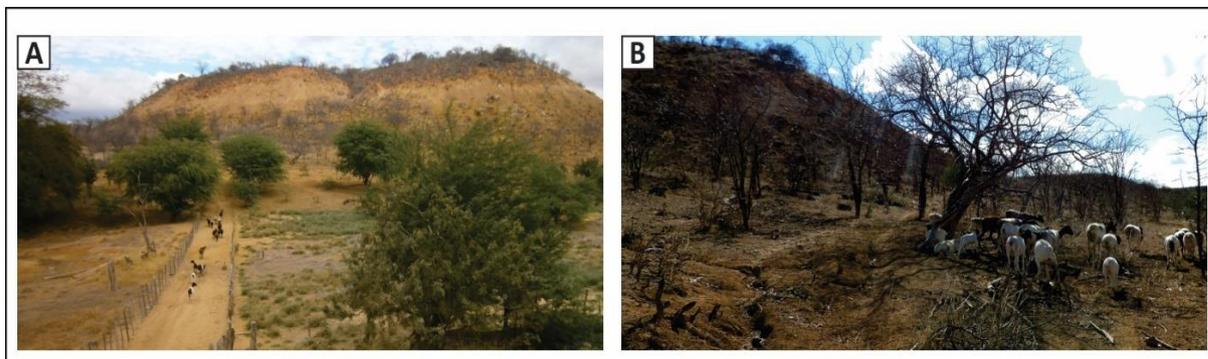


Foto a - Remoção total do plantio; Foto b - Área abandonada após remoção da plantação; Foto c - Área após queimada no plantio; Foto d - Área abandonada após remoção da plantação.

Este risco à devastação da caatinga é apresentado por Evangelista (2011); Santos (2016) em áreas de produção de sisal no semiárido baiano. Ibarrola-Rivas (2010) aponta alguns riscos na implantação da monocultura do agave no México, associados a devastação da cobertura florestal e a proliferação de pragas. O mesmo parece ter acontecido na área de estudo, que com seis décadas utilizando técnicas ecologicamente inapropriadas proporcionou o agravamento do quadro de deterioração ambiental, incluindo a aceleração da erosão, aumento na temperatura do solo, desequilíbrio bioquímico, diminuição da infiltração e da disponibilidade hídrica do solo, entre outros, capazes de, em um contexto climático semiárido, ampliar as possibilidades para o desencadeamento de um processo de desertificação.

A pecuária ainda é uma atividade presente no Salitre, e que além do rebanho bovino, ganha destaque na paisagem a criação de caprinos e ovinos (rebanhos melhor adaptados a condição ambiental local) criados de forma extensiva (BAHIA, 2017). O município de Campo Formoso possui um dos maiores rebanhos de caprinos (11°) e ovinos (12°) da Bahia (IBGE, 2020), constituindo atividades de suma importância para muitas famílias. As fotos da Figura 53 revelam presença de ovinos no leito seco do rio Salitre (Foto A) e em encosta próximo a margem do referido rio (Foto B) apresentado paisagem com baixa cobertura vegetal e alta exposição de solos.

Figura 53 - Presença de ovinos nas proximidades do rio Salitre, em uma propriedade na comunidade de Taboa.



A - Presença de caprinos e ovinos no leito seco do rio Salitre. B - Presença de ovinos em encostas próximas à drenagem do rio.

Os caprinos e ovinos na área de estudo utilizam a caatinga como pasto natural, transitando livremente por extensas áreas em busca de alimento. Áreas de caatinga pressionadas intensivamente por pastejo contínuo dessa criação de médio porte tendem a sofrer alterações de alguns atributos físicos do solo, devido ao maior pisoteio destes animais, que possuem hábito gregário, isto é, se alimentam em rebanho, resultado em uma pressão concentrada sobre determinadas áreas (PARENTE e MAIA, 2011)

De acordo com Drumond et al. (2003), a caatinga tem capacidade variável de suporte ao pastejo, mas em muitas situações essa capacidade é ultrapassada, provocando uma sobrecarga animal com significativas alterações na composição florística do local. Em condições de superpastejo, principalmente de caprinos, há problemas de regeneração e recomposição de espécies da caatinga. Estes animais se alimentam de inúmeras folhas, frutos, sementes, brotos e cascas das lenhosas (pastejo com até 2 metros de altura), podendo causar: anelamento de troncos, ampliando a mortalidade de espécies lenhosas; remoção das plântulas, impedindo a renovação vegetal; e a diminuição da produção de serapilheira (GONÇALO FILHO, 2015; FABRICANTE et al., 2017). Araújo Filho (2006) destaca algumas características anatômicas e comportamentais dos ovinos, que além de consumirem grande número de espécies botânicas da caatinga, possui hábito de pastejo com tosa rente ao solo, dificultando também a regeneração da planta. Fabricante et al. (2017) aponta que o pastejo por caprinos e ovinos é atualmente um dos maiores entraves para a recuperação de áreas degradadas no semiárido nordestino.

As citadas condições são agravadas significativamente quando os períodos de estiagem são mais duradouros, ou quando o ambiente já se encontra parcialmente degradado. Enfim, a exploração pecuária e a monocultura do sisal na bacia do Salitre, sem manejo adequados, são atividades de alto risco ambiental, constituindo fatores responsáveis pela significativa redução

da densidade da cobertura vegetal e ampliação/manutenção da exposição dos solos, que favoreceram a aceleração da dinâmica degradacional, comuns em áreas desertificadas.

#### **7.2.4. Solos carbonáticos, seus atributos e o processo de desertificação no médio curso do rio Salitre.**

Os atributos dos solos devem ser considerados como um dos principais condicionantes do processo de desertificação (KHANAMANI et al., 2017), o que para Sampaio et al. (2003); Avni (2005); Sá et al. (2010); Salvati et al. (2015); Sarparast et al. (2018) e Zweig et al. (2018) está relacionado a maneira como estes respondem à erosão. Tang et al. (2019) afirmam que as paisagens cársticas superficiais (exocarste) representam um dos ecossistemas mais frágeis e vulneráveis diante da ameaça da degradação e mudanças ambientais, sendo geralmente difícil de reverter, principalmente por causa das peculiaridades dos solos.

Abordagens específicas sobre a desertificação em áreas carbonáticas foram realizadas particularmente na China, por Yuan (1997); Wang et al. (2004a); Li et al. (2009); Yang et al. (2011); Jiang et al. (2014); Zhang et al., 2016; Tang et al. (2019); Yan et al. (2019), entre outros, que utilizam o termo desertificação rochosa cárstica (*karst rocky desertification*) para caracterizar transformações na paisagem cárstica superficial, representadas pela remoção dos solos e a exposição do embasamento rochoso carbonático. Nessa concepção, a desertificação rochosa ocorre sob áreas com condições ecológicas e geológicas especiais, e o termo é usado diante de intensas alterações que favoreceram a perda da cobertura vegetal e do manto pedológico carbonático. Este processo também é descrito em outros países ou regiões do mundo, como no sul da Europa, na América Central, México, Oriente Médio e Leste e Sudeste da Ásia (FORD e WILLIAMS, 2007).

Wang et al. (2004a) afirmam que as principais características deste processo de desertificação em áreas cársticas são: grave erosão do solo; extensa exposição de materiais do embasamento; diminuição drástica da produtividade do solo; redução da biodiversidade; diminuição da capacidade de retenção de água nos solos; o baixo escoamento fluvial; e aparência de uma paisagem desértica. A principal causa apontada pelos autores são as atividades humanas, mas reconhecem a condição de alta fragilidade natural do ambiente cárstico carbonático.

Jiang et al. (2014) também afirmam que no contexto cárstico a zona insaturada não pode manter o nível da água devido à alta permeabilidade das fraturas típicas de regiões cársticas, reduzindo a capacidade de armazenamento de água nas camadas do solo, o que resulta na

deficiência de umidade no solo para o crescimento da vegetação. Este fator acelera o ressecamento dos solos.

A maioria dos estudos sobre desertificação rochosa cárstica foi desenvolvida em clima semiúmido, mas Li et al. (2009) apontam que em áreas mais secas a questão da perda de solo é significativamente pior, pois o manto pedológico possui profundidade ainda menor, além do que as sementes armazenadas e os principais nutrientes são encontrados apenas no topo do perfil do solo, isto é, na camada mais susceptível à erosão.

Todos os solos no interior da dfv possuem composição comprovadamente carbonática, com parte expressiva atendendo as exigências para horizontes cálcicos, contendo  $150 \text{ g kg}^{-1}$  ou mais de carbonato de cálcio equivalente (SANTOS et al., 2018). Comparados aos solos do platô, a topossequência e os dados levantados em campo e laboratório revelaram solos com menor grau de desenvolvimento pedológico na dfv, bem como uma série de outros indicadores da sua menor resistência à erosão, conforme discutido a seguir.

Os solos do platô carbonático apresentam menor pedregosidade e menores valores da relação silte-argila. São solos mais cromados, cujas cores avermelhadas indicam condições de drenagem mais eficientes (KAMPF et al., 2012). Possuem estrutura em blocos, bem formados e relativamente firmes. São solos derivados diretamente das rochas sotopostas, tanto dos calcrite pedogênicos (P1), como os calcrites freáticos ricos em quartzo (P2). Esse último, embora não apresente caráter carbonático, apresenta caráter hipocarbonático, de acordo com Santos et al. (2018).

Na dfv há significativa pedregosidade nos horizontes  $\text{Ck}\bar{1}$  e  $\text{Ck}\bar{2}$ , com presença de fragmentos não-carbonáticos, morfologicamente organizados em linha, próximo a base do horizonte  $\text{Ck}\bar{2}$ , e distribuídos aleatoriamente na massa do solo. Ao considerar também a falta de tendências em diversos resultados das análises físicas e químicas entre os horizontes nos perfis (Tabelas 2 e 3), e o contato abrupto entre os horizontes pedregosos de cores brunadas com horizontes pulverulentos e esbranquiçados, indicam que os materiais de origem dos solos do compartimento dfv são autóctones na base e alóctones no topo. Como apresentado nos capítulos anteriores (4 e 5), a origem foi interpretada como coluvial.

Os colúvios da dfv constituem solos com horizontes muito friáveis, com ausência ou baixo grau de desenvolvimento dos agregados, além de elevados teores de silte e areia. Alguns horizontes também apresentam características vérticas, como fendilamentos, principalmente no terço inferior da vertente. Materiais coluviais podem constituir como um importante condicionante no desencadeamento de feições erosivas (MOURA e SILVA, 2001; AUGUSTIN e ARANHA, 2006). A alta friabilidade contribui para uma desagregação rápida das unidades

estruturais (REICHERT et al., 2010). As características hidrodinâmicas impostas pelas condições vérticas (baixa condutividade hidráulica) reduzem a drenagem interna e ampliam o escoamento superficial (OLIVEIRA, 2008; SOMASUNDARAM et al., 2018; SINGH et al., 2019).

Os horizontes esbranquiçados da base correspondem a saprolitos, calcretes pulverulentos e tufos calcários, geralmente com CCE superior a  $800 \text{ g kg}^{-1}$ . São materiais altamente friáveis após umedecimento e com baixos valores de material orgânico (variando entre 0,1 e  $5,5 \text{ g kg}^{-1}$ ), o que lhes conferem elevadíssimo potencial de desagregação e movimento. Como já destacados, estão sendo cada vez mais expostos.

Vale acrescentar que materiais com grande acumulação de carbonato de cálcio possuem poros obstruídos, promovendo aumento da densidade aparente no horizonte de acumulação, implicando na redução do suprimento de água e oxigênio para as plantas (GEORGEN et al., 1991; BAUMHARDT e LASCANO, 1993; ZAMANIAN et al., 2016). Este fato tendência para o aumento do escoamento superficial e redução do potencial biológico do solo.

Certamente um dos fatores que contribuem na instabilidade das vertentes na dfv diz respeito às peculiaridades químicas destes carbonatos secundários. Os solos possuem propriedades químicas influenciadas pelos altos valores do pH, pelo excesso de cálcio e pelos carbonatos. Estes solos, de acordo com Moreira et al. (2000), apresentam significativa diminuição da disponibilidade de alguns micronutrientes. O excesso de cálcio pode aumentar a precipitação de fósforo, diminuindo sua disponibilidade para as plantas, além de inibir a absorção de alguns micronutrientes, como ferro, zinco e cobre (BECZE-DEÀK et al., 1997; MOREIRA et al., 2000; ZAMANIAN et al., 2016). A precipitação e acúmulo de  $\text{CaCO}_3$ , processo pedogenético em atividade na dfv, afeta as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, portanto, afeta o crescimento da planta e a produtividade do solo (NORDT et al., 1998; ZAMANIAN et al., 2016), dificultando significativamente a regeneração da cobertura vegetal.

O alto valor de pH pode contribuir também com o aumento do conteúdo de argila dispersa, o que dificulta a formação de agregados mais estáveis (SPERA et al., 2008). Este aspecto é corroborado por Tang et al. (2019), que acrescenta a grande dificuldade de reversão de processos de degradação em áreas com solos carbonáticos.

Em grande parte da área analisada a reversão para uma condição de manutenção ou regeneração natural da cobertura vegetal é bastante limitada, haja vista a perda total ou parcial do *solum* pela erosão, que expôs calcretes e materiais altamente calcínicos dos horizontes subsuperficiais. Esse fato implica rigorosamente na diminuição da espessura dos solos,

afetando, de acordo com Sampaio et al. (2003), diretamente na perda de nutrientes para as plantas e redução de volume de materiais para suporte de muitas espécies vegetais (suporte físico/crescimento de raízes), além da redução de espaço para o armazenamento de água. Os citados autores complementam que, de fato, a erosão é capaz de gerar um processo de degradação irreversível, destacando que a formação de alguns centímetros de solo pode levar centenas ou milhares de anos e sua perda causa danos irreparáveis.

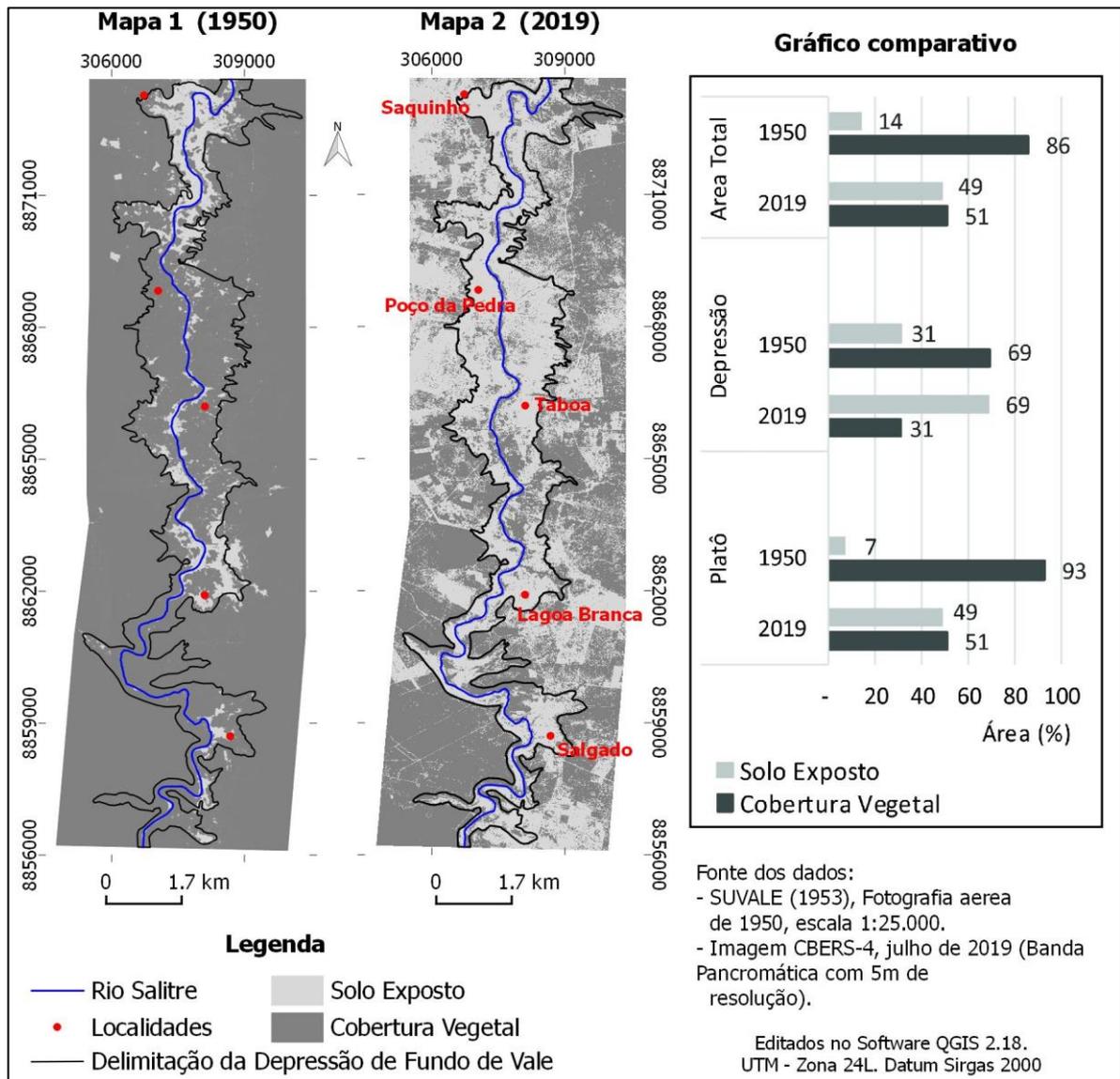
#### **7.2.5. Alteração na cobertura vegetal e ampliação da exposição dos solos: uma visão em distintas imagens**

Este tópico busca mostrar que a maior manifestação do processo de desertificação na área é dada pela relação entre a retirada da cobertura vegetal e a erosão do solo, inclusive contribuindo para a dificuldade de restabelecimento dessa cobertura. Para isso um passeio entre imagens de satélites, fotografias aéreas e fotografias em campo será realizado.

Em um trecho entre as comunidades de Saquinho e Salgado (área total de 87,5 km<sup>2</sup>) no médio curso da bacia do rio Salitre foi realizada classificações e análises de fotografias aéreas de 1950 (representado paisagem na estação seca com escala de 1:25.000) e de imagens de satélite CBERS-4 (câmara pancromática com 5m de resolução espacial) datada de julho 2019 (fase inicial da estação seca), com o objetivo de comparar a distribuição espacial das classes de “solo exposto” e “cobertura vegetal”, para verificar as alterações na condição da superfície em 70 anos. A cobertura vegetal está representada pela soma entre áreas de caatinga e áreas com cultivos, onde não se apresenta exposição da superfície.

Os resultados desta comparação são apresentados na Figura 54, que além dos dois mapas, possui um gráfico comparativo que retrata as diferenças na área total, e nos dois compartimentos de relevo presentes, platô carbonático e depressão de fundo de vale. Inicialmente foi possível apontar que a área total possuía 86% de cobertura vegetal e 14% de solo exposto, e sete décadas depois houve alteração na cobertura vegetal, sendo reduzida para 51%, e considerável crescimento na exposição dos solos, que subiu para 49%.

Figura 54 - Mapas e gráficos comparativos entre solo exposto e cobertura vegetal referente aos anos de 1950 e 2019, em um trecho que apresenta dois compartimentos de relevo, no médio curso da bacia do Salitre – Bahia.



Neste intervalo de tempo ocorreu grande pressão humana sobre a área, a partir do surgimento de localidades (povoados) e maior uso do solo por atividades econômicas (como apresenta no subtópico anterior), visto que o aumento na área com solo exposto ocorreu em conjunto com alterações na estrutura da paisagem, a partir do aparecimento e expansão das áreas (polígonos) representativas de cultivos agrícolas e ou pecuária, além de estruturas lineares representativas de caminhos rurais e estradas.

O platô carbonático (ao centro) e a dfv (nas porções leste e oeste) (FIGURA 54) mostram o mesmo comportamento, isto é, incrementos nas áreas com solos expostos. Embora as diferenças entre 1950 e 2019 sejam maiores no platô, com perda de 42% de área vegetada

comparada a uma perda de 38% na dfv, é no fundo de vale que se observa uma maior exposição de solos no atual cenário.

Um dos aspectos que chama atenção é a diferença na cobertura vegetal entre os dois compartimentos. Em 1950, apesar da incipiente ocupação humana, havia no interior da depressão 31% de solo exposto e no platô apenas 7%, demonstrado a maior instabilidade da paisagem no primeiro compartimento. A referida instabilidade na área da depressão de fundo de vale pode ser explicada, dentre outros fatores, pelos agentes morfogenéticos instalados, cerceados pelo recuo das vertentes em condições agressivas de erosão linear (Capítulo 5) e pelas propriedades dos solos (Capítulo 4).

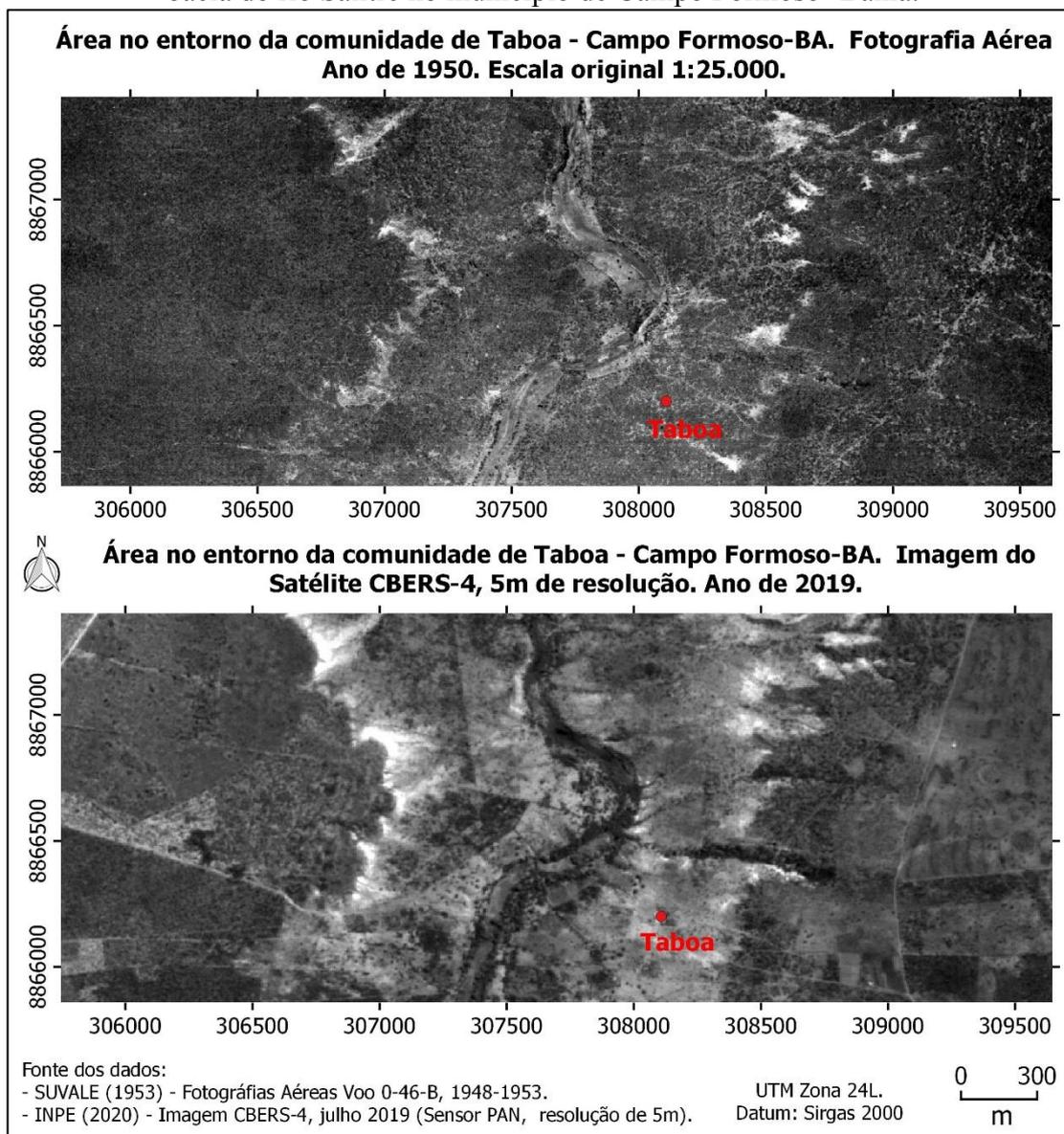
Em 2019 a exposição dos solos atingiu 69% na dfv e 49% no platô, mesmo a imagem acusando que o uso do solo atual é menor no primeiro e maior no segundo compartimento. Portanto há respostas distintas nos compartimentos em função do uso, denunciando maior instabilidade na depressão.

Ainda que não tenham sido utilizadas para quantificação por incompatibilidade de escala (1:60.000), as fotografias aéreas de 1964 (ACGS, 1964) mostram vários polígonos representativos de cultivos agrícolas nas vertentes em locais onde havia caatingas (em 1950), sendo possível afirmar ocupação mais agressiva, envolvendo a retirada total da caatinga em alguns trechos, ocorreu a partir da década de 1960.

Outra informação importante, e que abarca toda área entre Saquinho e Salgado, é que no platô foi possível apontar áreas em que a cobertura vegetal foi parcialmente recomposta (após abandono no uso agrícola), demonstrando algum potencial de recuperação de parte das funções ecológicas desta área. Já nas vertentes da depressão não foram identificadas áreas onde a cobertura vegetal foi recomposta, reiterando que este compartimento funciona de maneira diferente, e que uma vez ocorrida a exposição dos solos, processos morfogenéticos de superfícies tornam-se agressivos de tal maneira que restringem a capacidade de regeneração da caatinga.

Para melhor expressar as marcantes diferenças na paisagem entre 1950 e 2019, foi realizado movimento escalar para uma condição mais detalhada (amostra de recorte espacial), apresentada na Figura 55, referindo-se a um pequeno trecho no entorno da comunidade de Taboa, mantendo a comparação da fotografia aérea com as imagens CBERS. A figura é bastante provocativa, já que o recorte é apenas uma amostra das transformações ocorridas em toda área nas proximidades do rio Salitre em seu médio curso.

Figura 55 - Comparação entre fotografia aérea de 1950 e imagem de Satélite de 2019 em um mesmo recorte espacial nos arredores da atual comunidade rural de Taboa, no médio curso da bacia do rio Salitre no município de Campo Formoso- Bahia.



Parte expressiva dos solos expostos no interior da depressão de fundo de vale (poção central das fotos) possui coloração esbranquiçada nas imagens, que em campo foi confirmada cores variando entre o branco, bruno-claro-acinzentado, bruno muito claro-acinzentado e cinzento-claro, manifestando exposição de horizontes subsuperficiais (Ck) relativos aos calcetes freáticos, principalmente os mais pulverulentos. A Figura 55 constitui uma amostra assertiva justamente porque mostra, pela comparação das imagens, que essas manchas brancas têm aumento com o tempo.

Em uma imagem gerada por VANT Multirotor (Drone) em março de 2019 (FIGURA 56), com resolução espacial de 4cm, também foi possível detalhar a exposição dos solos em uma

vertente na comunidade da Taboa (trecho superior e parte da média encosta). Nesta área foi verificado que: i) o uso da terra está apenas para pastejo de ovinos e caprinos; ii) a cobertura vegetal é composta por algumas poucas espécies isoladas com porte arbóreo e arbustivo (caatinga secundária), sem a presença do porte herbáceo; iii) ocorre significativa exposição de raízes; iv) há grande densidade de feições erosivas lineares (ravinamentos e voçorocamentos) e v) há frequente exposição dos horizontes esbranquiçados ajustados às feições erosivas lineares.

Figura 56 - Recorte espacial de parte de uma vertente na comunidade rural de Taboa.

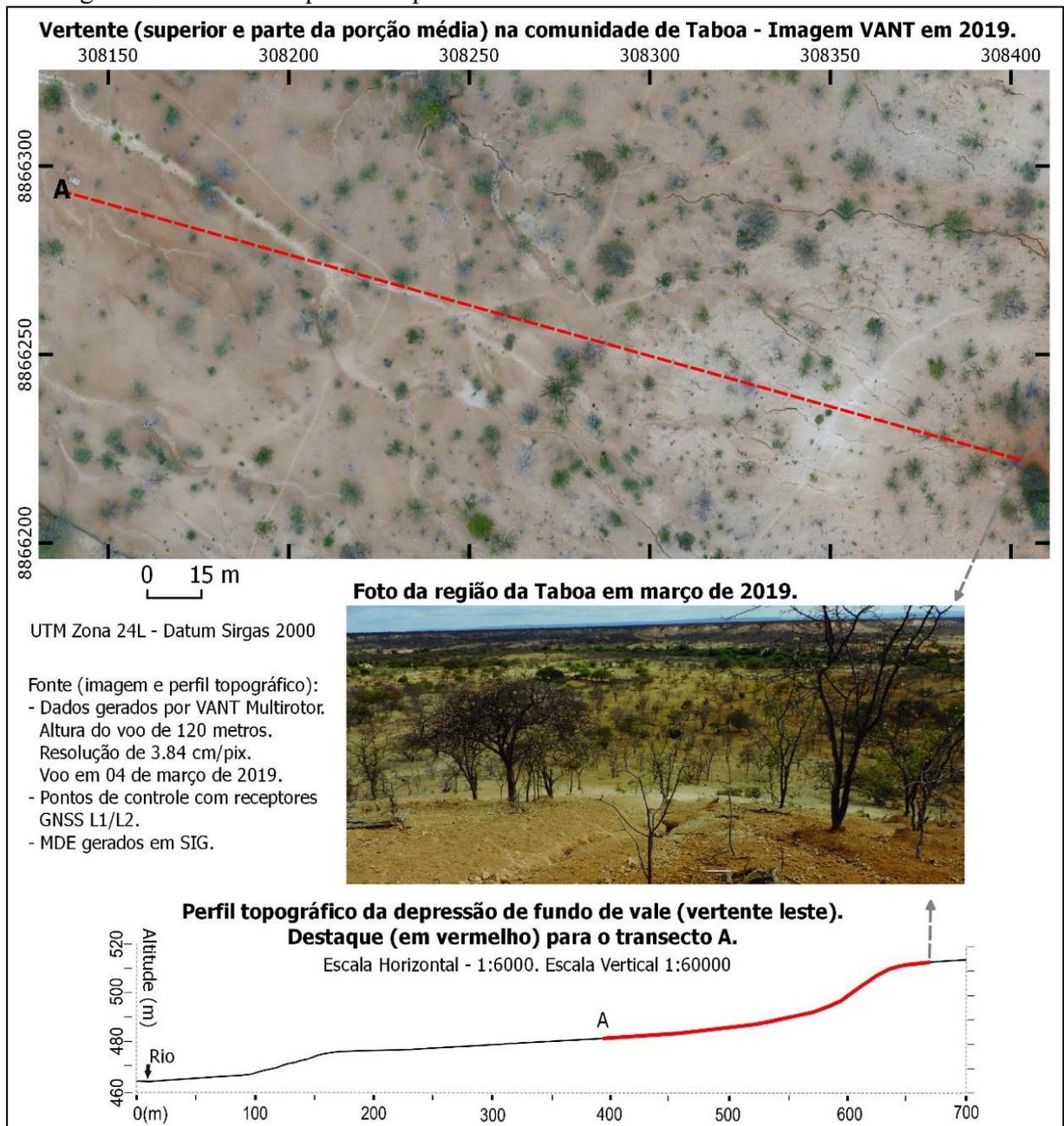


Imagem gerada por VANT (parte superior); fotografia com visualização a partir da alta vertente (ao centro); perfil topográfico com destaque para o transecto da imagem VANT (abaixo)



remoção de solo da vertente. São principalmente os CAMBISSOLOS HÁPLICOS Carbonáticos, e constituem 6% da superfície exposta.

2 - Exposição de horizonte  $C\bar{k}$  e resíduos do horizonte B e porções transicionais C/B, com materiais brunos (coloração predominantemente), representando moderada a alta remoção de solos. Estes correspondem a depósitos de encostas com baixo desenvolvimento pedogenético, que perderam parcialmente ou totalmente o *solum*, ou alguns depósitos de sedimentos carbonáticos na planície de inundação. Representam 31% no contexto da área.

3 - Exposição de horizonte  $C\bar{k}$  e materiais transicionais com os saprolitos e/ou calcretes pulverulentos e/ou tufos da base, com coloração bruno-amarelada e bruno muito claro acinzentado, representando elevada remoção de materiais com nível avançado de degradação. Corresponde aos fragmentos finais dos colúvios na média e baixa vertentes, a neossolos decapeados na alta vertente, ou sedimentos carbonáticos na planície de inundação ou no interior de feições de ravinamentos, representando 28% da área, de acordo com a Figura 57.

4 - Exposição de materiais brancos a cinzento-claro, correspondendo a calcretes pulverulentos ou saprolitos carbonáticos, que estão na base da cobertura pedológica por praticamente toda a área. Esta condição representa total remoção de materiais coluviais e/ou pedogeinizados, com nível avançado de degradação, e equivale a 2% das superfícies exposta nas vertentes.

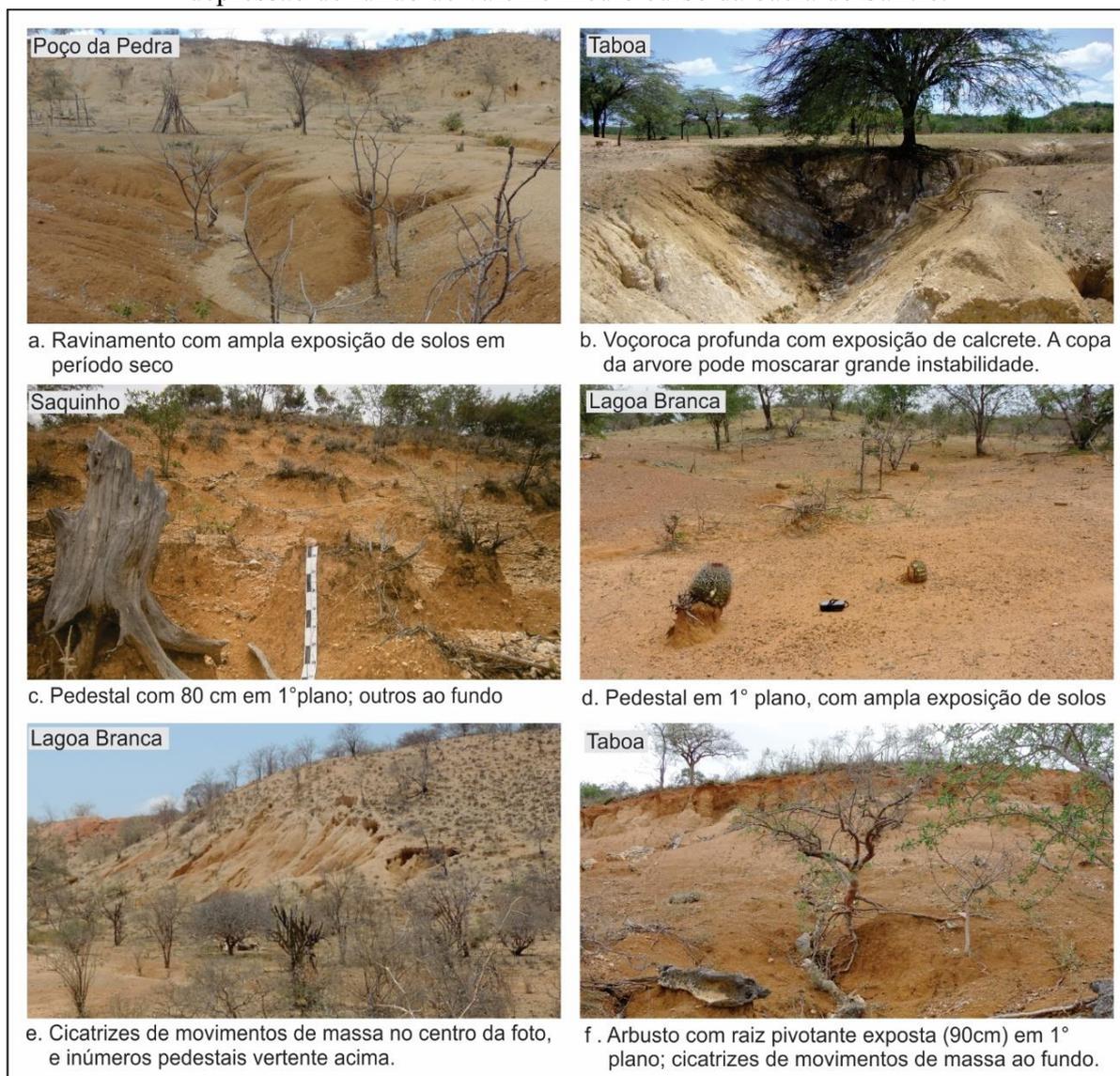
5 – Cobertura vegetal, correspondendo aos diversos estágios, portes e características da caatinga no local, preenchendo 34% da área, frente aos 66% de exposição dos solos. Há maior densidade na planície de inundação e leito seco do Salitre, assim como ao longo da drenagem de um dos afluentes efêmeros no norte do recorte espacial (FIGURA 57).

A cobertura vegetal atual não garante estabilidade para as vertentes, com baixa presença do porte herbáceo, que é significativamente importante na proteção frente ao processo erosivo. Outra condição importante é que a imagem foi gerada em período chuvoso no local, que estabeleceu significativa influência da cobertura vegetal na ortofoto. Parente et al. (2012) afirma que o brotamento da caatinga acontece logo após o início do período chuvoso e é caracterizado pelo aparecimento expressivo de folhas, com coloração geralmente verde-claro. Isso quer dizer que no período seco a exposição dos solos é ainda maior.

Como um último passo no trânsito pelas imagens em busca dos indicadores que mostram a exposição dos solos e supressão da cobertura vegetal, ativando ainda mais o processo de desertificação, apresentamos as feições que, em campo, retratam as situações descritas acima.

Nos arredores de Abreus, Saquinho, Poço da Pedra, Lagoa Branca, Salgado e Salgadinho, foi observada uma variedade tipológica de feições indicadoras da grande remoção de solos (FIGURA 58), como: ravinas e voçorocas (Fotos a, b); pedestais (Fotos c, d, e); cicatrizes de movimentos de massa (e, f); e raízes expostas por processos erosivos (Foto f).

Figura 58 - Exposição dos solos com feições de remoção em diversas localidades na depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre.



Obs.: Cada foto apresenta no canto superior esquerdo sua localização e logo abaixo discrimina a feição enfatizada

As feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas) possuem dinâmica degradacional com crescimento remontante, iniciadas na baixa e média encostas e progredindo em direção ao degrau que separa os dois compartimentos (platô e dfv). Os pedestais (*demoiselles*) constituem colunas de solos isoladas, que foram protegidas da ação erosiva por raízes de plantas ou pedras,

concebendo-se como testemunhos da existência de antiga superfície (BERTONI E LOMBARDI NETO 2008; ANH et al. 2014). Os pedestais podem atingir até 80 cm de altura profundidade e estão presentes em diversas partes da depressão de fundo de vale. As cicatrizes de movimentos de massa e a exposição de raízes constituem, igualmente, feições claras e evidentes da remoção dos horizontes superficiais da cobertura pedológica, com a iminente exposição de materiais altamente calcíticos. As cicatrizes estão localizadas no talude que forma o degrau entre os dois compartimentos geomorfológicos (declividade em torno de 20 a 35%), sendo que o material proveniente deste processo se dispersa ao longo da rampa entre o talude e a planície de inundação do rio Salitre. As raízes expostas ocorrem na base de plantas arbustivas e arbóreas, típicos da caatinga. A queda de árvores pela perda de sustentação é um fenômeno muito frequente na área de estudo.

A Figura 58 exemplifica algumas características da exposição dos solos carbonáticos na área, apontando para a degradação extrema das terras, onde a ação erosiva persistente e cumulativa está instalada, provocando ampliação das limitações para a regeneração da caatinga. Neste caso, é bastante razoável apontar um processo de desertificação em curso. D’Odorico et al. (2013) afirmam que na maioria dos casos a desertificação envolve um aumento persistente do solo exposto, à custa da cobertura vegetal.

#### **7.2.6. Desertificação cárstica ou desertificação em área carbonática?**

A abordagem utilizada neste trabalho é condizente com os conceitos utilizados para definir ‘*karst rocky desertification*’ (YUAN 1997; WANG et al. 2004a; LI et al. 2009; YANG et al. (2011); JIANG et al. 2014; ZHANG et al., 2016; TANG et al. 2019; YAN et al. 2019). Isso quer dizer que a mais expressiva manifestação da desertificação na área é a grande exposição dos materiais abaixo do *solum*, que apesar de não serem materiais consolidados (rochosos) como no caso da desertificação em áreas cársticas na China, aqui são expostos materiais altamente calcíticos que limitam significativamente a regeneração da caatinga.

No semiárido brasileiro, o estudo da desertificação em áreas cársticas ou sobre solos carbonáticos ainda é incipiente, e mesmo estando presente em algumas áreas bastante vulneráveis à desertificação, não recebem destaque que possibilite uma análise sistemática de suas peculiaridades. Um dos poucos trabalhos onde o ambiente carbonático ganha ênfase no processo de desertificação é o estudo apresentado por Santos (2016), no qual é apontada a existência de uma área afetada pela desertificação (*hotspot*), constituindo, segundo o autor, uma desertificação em carste ou desertificação cárstica em clima semiárido.

No caso da área de estudo, acredita-se que o termo desertificação sobre calcretes e solos carbonáticos é mais adequado, sem dar ênfase ao termo “cárstico”, conceitualmente associado às morfologias desenvolvidas com o predomínio da dissolução de determinadas rochas, com feições específicas, como lapiás, dolinas, uvalas, vales cegos, cânions cársticos, poljes, cones ou torres (JENNINGS, 1985; PILÓ, 1998; GUNN, 2004; AULER et al., 2005; FORD e WILLIAMS, 2007). Apesar da existência de paleoformas cársticas no contexto regional, os processos geoquímicos na dfv e borda do platô não favorecem a dissolução e produção de feições típicas do carste, e sim atuam com forte predominância da precipitação de carbonatos nos solos, com amplo arranjo de microestruturas calcíticas, atreladas à gênese de  $\text{CaCO}_3$  secundários e pedogenéticos. Além do que, o principal material de origem dos solos são principalmente calcretes quaternários, com degradação vinculada a uma morfodinâmica típica de climas com déficit hídrico.

Independente do termo, o quadro ambiental apresentado no compartimento dfv dificulta a recuperação da área e promove uma degradação de difícil reversão, pois as condições instaladas possuem efeito retroalimentador (feedback), que de acordo com D’Odorico et al. (2013), conduzem o sistema a uma espiral descendente de degradação. Essas limitam a capacidade do ambiente de recuperar seu estado inicial, o que quer dizer que a perda inicial de cobertura vegetal desencadeou uma sequência de processos que favoreceram ainda mais a diminuição na cobertura vegetal. Em síntese, a exposição dos solos desencadeia e acelera processos que removem o *solum*, que por sua vez realimenta e amplifica persistentemente superfícies sem cobertura vegetal.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A paisagem apresentada no médio curso do Salitre foi investigada a partir de um encadeamento escalar que revelou intrínseca relação entre fenômenos estudados na macroescala, mesoescala e microescala (Apêndice D), a saber: a) paisagem identificada por sensores remotos, constituindo manchas esbranquiçadas quilométricas e em expansão; b) vertente possuindo alta densidade de feições erosivas com significativa perda de solo e forte exposição dos horizontes subsuperficiais; c) feições de precipitação de carbonatos em solos, como nódulos, revestimentos e preenchimentos, verificadas a partir da descrição morfológica, análise química e micromorfológica. Os citados fenômenos estão em expansão progressiva, em direção a: I) ampliação da presença relativa das pedofeições calcíticas, horizontes cálcicos e calcretes nos solos, e; II) ampliação da degradação na vertente, que em interação com o quadro ambiental de pobreza e devastação da caatinga, denuncia um possível processo de desertificação.

Reafirma-se a coerência na relação entre a presença expressiva de pedofeições de acumulação de carbonatos nos materiais (preenchimentos com calcita micrítica, microesparítica e esparítica; preenchimento com calcita fibrosa-acicular; hipo-revestimentos e revestimentos calcíticos; além de formação de nódulos) e a exposição de horizontes cálcicos e calcretes na depressão de fundo de vale, uma vez que as condições químicas e físicas dos solos propiciam instabilidades morfogenéticas (redução da porosidade e da infiltração / aumento do escoamento superficial) e limitações químicas ao desenvolvimento/regeneração da caatinga, condições estas, importantes para o desencadeamento da erosão, que por sua vez, incrementam a consolidação das manchas persistentes de solos expostos e a desertificação. É possível afirmar que a perda de *solum*, a redução da biomassa e o ressecamento excessivo dos solos (alguns dos condicionantes à desertificação) auxiliam na intensificação da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nos solos. Por outro lado, este último processo contribui para condições que favorecem a persistência dos solos expostos.

Com um clima submetido a longos períodos anuais de escassez hídrica, intercalados com eventos torrenciais, que, quando associados às maiores declividades topográficas, potencializam a energia cinética das enxurradas e aceleram a desagregação das estruturas dos solos. Esta situação ambiental interage com uma ocupação das terras baseada na supressão da cobertura vegetal, que intensificam os processos e as consequências socioambientais, apontando para um cenário que acarreta redução gradativa da capacidade produtiva, tanto do ponto de vista biológico como econômico. Neste contexto afirmou-se que as condições

ambientais do local não estão permitindo a retomada da caatinga, e sim o avanço da instabilidade na paisagem, inferindo-se sobre o desencadeamento da desertificação na área da dfv no médio curso da bacia do Salitre.

Foi apontado que a intensa erosão nas vertentes e a movimentação de materiais para o leito do Salitre segue uma tendência estabelecida frente a atual fase evolutiva do modelado da superfície, dentro de sua morfodinâmica quaternária, sabendo-se que durante ciclos paleoclimáticos mais úmidos houve incisão do talvegue e desenvolvimento dos solos nas encostas, mas durante os ciclos mais áridos (semelhante ao atual) há recuo de vertentes por erosão e abertura da depressão com agradação do fundo do vale. Evidentemente que a ocupação desordenada nas últimas décadas exacerbou o citado processo no atual contexto semiárido, alimentando e caracterizando o quadro ambiental de alta degradação com efeito retroalimentador, e de difícil reversão.

A paisagem também foi analisada a partir da temporalidade dos processos, com isso, foi abordado a morfogênese quaternária (na escala geológica) e a retirada da caatinga nas últimas décadas. Ambas, enquanto dinâmicas pretéritas, influenciaram decisivamente na instabilidade geomórfica atual, como a alta densidade das feições erosivas lineares. Partindo de uma perspectiva atual, mas caracterizada como um processo em expansão, se estabelece um cenário de desertificação, que de acordo com o contexto da área e os atributos analisados, também fará parte do quadro ambiental futuro.

Verifica-se que na abordagem sobre desertificação houve forte valorização do contexto evolutivo do quadro natural e das características e atributos dos solos, visto que há na paisagem analisada, inequívocas atividades morfogenéticas e pedogeomorfológicas que estão atuando intensamente, condicionadas em parte, pelos processos de evolução das encostas em interação com materiais carbonáticos bastantes susceptíveis à remoção, e a precipitação de carbonatos.

Neste sentido, é crucial o entendimento das limitações ao uso no compartimento dfv, estabelecendo de forma urgente a construção de planos de ocupação baseados na recuperação da degradação, na melhoria da qualidade de vida dos atuais residentes, com atividades produtivas obedientes às restringências específicas de uma área generalizadamente instável.

Por isso, a partir do conhecimento do quadro socioambiental, parcialmente caracterizado nesta tese, é possível uma urgente intervenção, visando frear o desflorestamento, baseado numa ordenação do uso da terra, estabelecendo policulturas agrícolas (frutíferas, leguminosas e forragens para consumo animal) desenvolvidas sob práticas conservacionistas do solo e adaptadas às condições de déficit hídrico local, consociadas à criação de pequenos e médios animais, em áreas rigorosamente delimitadas e racionalmente posicionadas em segmentos

planos ou suave-ondulados nas vertentes. As atividades precisam estar integradas com um trabalho de recaatingamento em cada propriedade com espécies nativas, orientada por um estudo botânico local.

Para aumentar a oferta de água, visando o uso econômico, é fundamental a adoção de tecnologias sociais de convivência com o semiárido, principalmente de captação de água de chuva, como por exemplo, a construção e/ou ampliação de novas unidades de cisternas de produção que captem água diretamente da enxurrada e de cisternas do tipo calçadão, capazes de armazenar aproximadamente 50.000 litros de água (em apenas uma) durante um evento chuvoso. É também possível o aproveitamento do potencial hidrogeológico do aquífero cárstico local, que já é pontualmente explorado. Neste sentido, a irrigação racional e controlada, baseada em baixas lâminas de água, deverá ser uma grande aliada, tanto no desenvolvimento de atividades produtivas, como no auxílio nas etapas iniciais da recomposição da caatinga.

Qualquer atividade de recuperação da degradação no médio Salitre ou combate à desertificação, por mais ampliada e intensa, não reverterá a tendência morfogenética baseada na erosão dos solos (geneticamente estabelecida na paisagem), mas certamente reduzirá a intensidade dos processos de degradação instalados, oportunizando a ampliação de áreas com cobertura vegetal e conseqüentemente menos instáveis, contribuindo para diminuir a velocidade e o volume de solos removidos das vertentes e sua deposição no leito do Rio Salitre. As intervenções enfatizadas precisam estar embricadas por ações de cunho social, capazes de gerar novas oportunidades econômicas para os indivíduos das comunidades rurais posicionadas próximas ao rio. Seguindo este raciocínio, entende-se não ser suficiente projetos isolados de recuperação de áreas degradadas, mas a necessária inserção do médio Salitre em um programa de combate à desertificação, com esforços de natureza política e econômica dos poderes locais, do estado da Bahia e do governo federal.

## REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Gênese das vertentes pendentes em inselbergs do nordeste brasileiro. *Geomorfologia*. n.14, 1969a. p. 6-8.
- AB'SABER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do nordeste brasileiro. *Geomorfologia*. n.19, 1969b. p.1-38.
- ABRAHAM, E. M.; BEEKMAN, G. B. (Ed.). Indicadores de la desertificación para América del Sur: recopilación y armonización de indicadores y puntos de referencia de la desertificación a ser utilizados en el programa "Combate a la desertificación y mitigación de los efectos de la sequía en América del Sur". Mendoza: Martín Fierro, 374 p. 2006.
- ACKLAS Jr., R.; ETCHEBEHERE, M. L. C.; CASADO, F. C. Análise de perfis longitudinais de drenagens do Município de Guarulhos para a detecção de deformações neotectônicas. *Revista UnG – Geociências*, ano 6, n. 8, p. 64-78, 2003.
- ADAMS, A.E.; MACKENZIE, W.S. A Colour Atlas of Carbonate Sediments and Rocks Under the Microscope. Manson publishing, 1998. 180 p.
- ADAMS, B. J.; FRASER, H. G.; HOWARD, C. D.; HANAFY, M. S. Meteorological data analysis for drainage system design. *Journal of Environmental Engineering*, v. 112, n. 5, p. 827-848, 1986.
- AEROSPACE CARTOGRAPHIC AND GEODETIC SERVICE – ACGS. Fotografias aéreas. Projeto AF63-32A (Área 9), realizado entre os anos de 1964-1970. Escala 1:60.000
- AKBAR, M.; ALGHAMDI, H.; ALLEN, D.; CARNEGIE, A.; DUTTA, D.; OLESEN, J. R.; CHOURASIYA, R. D.; LOGAN, D.; STIEF, D.; NETHERWOOD, R.; RUSSEL, S. D.; SAXEMA, M. Evaluation of carbonate reservoirs. *Oilfield Review*, p. 20 - 43, 2001.
- AKUJA, T. E.; AVNI, Y.; ZAADY, E. Soil erosion and other factors as indicators of desertification processes in an agroecosystem in the Northern Negev Desert. In: *Soil Erosion Research for the 21<sup>st</sup> Century - International Symposium*. Honolulu-Hawaii-USA: ASAE, p. 3-5, 2001.
- ALÇIÇEK, H.; ALÇIÇEK, M. C. Palustrine carbonates and pedogenic calcretes in the Çal basin of SW Anatolia: Implications for the Plio-Pleistocene regional climatic pattern in the eastern Mediterranean. *Catena*, v. 112, p. 48-55, 2014.
- ALLISON, L. E.; MOODIE, C. D. Carbonate. In: Black, C. A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis - Part 2*. Madison-WI: American Society of Agronomy: 1965. p. 1379–1396.
- ALMEIDA, F. F. M. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, B. G.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. Padronização de

métodos para análise granulométrica no Brasil. Comunicado Técnico 66. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. p.1-11.

ALONSO, P.; DORRONSORO, C.; EGIDO, J. A. Carbonatation in palaeosols formed on terraces of the Tormes river basin (Salamanca, Spain). *Geoderma*, v. 118, n. 3-4, p. 261-276, 2004.

ALONSO-ZARZA, A. M. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews*, v. 60, n. 3-4, p. 261-298, 2003.

ALONSO-ZARZA, A. M. Study of a modern calcrete forming in Guadalajara, Central Spain: An analogue for ancient root calcretes. *Sedimentary Geology*, v. 373, p. 180-190, 2018.

ALONSO-ZARZA, A. M.; WRIGHT, V. P. Calcretes. In: ALONSO-ZARZA, A. M.; TANNER, L. H. (Ed.). *Carbonates in continental settings: facies, environments, and processes. Developments in Sedimentology*, v. 61, p. 225-267, 2010a.

ALONSO-ZARZA, A. M.; WRIGHT, V. P. Palustrine Carbonates. In: ALONSO-ZARZA, A. M.; TANNER, L. H. (Ed.). *Carbonates in continental settings: facies, environments, and processes. Developments in Sedimentology*, v. 61, p. 103-131, 2010b.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V.; CÂNDIDO, G. A. Indicadores socioeconômicos e a desertificação no alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba. *Ambiente & Sociedade*, v. 20, n. 2, p. 19-40, 2017.

AMORIM, R. D. F. Integração entre dinâmicas geomorfológicas multitemporais no planalto da Borborema, Semiárido do NE do Brasil. 193 f. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

AMUNDSON, R. G.; GRAHAM, R. C.; FRANCO-VIZCAINO, E. Orientation of carbonate laminations in gravelly soils along a winter/summer precipitation gradient in Baja California, Mexico. *Soil Sci.*, n. 162, p. 940–952, 1997.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Séries Históricas de Estações - Dados Pluviométricos. Disponível em Hidroweb: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 5 mai. 2020.

ANGELOTTI, F.; SÁ, I. B.; MELO, R. F. Mudanças climáticas e desertificação no semi-árido brasileiro. In: ANGELOTTI, F.; SÁ, I. B.; MENESES, E. A.; PELEGRINO, G. Q. (Eds.). *Mudanças climáticas e desertificação no semi-árido brasileiro*. Petrolina-PE: EMBRAPA, 2009. p. 41-49.

ANH, P. T. Q.; GOMI, T.; MACDONALD, L. H.; MIZUGAKI, S.; VAN KHOA, P.; FURUICHI, T. Linkages among land use, macronutrient levels, and soil erosion in northern Vietnam: a plot-scale study. *Geoderma*, v. 232, p. 352-362, 2014.

ARAKEL, A. V.; MCCONCHIE, D. Classification and genesis of calcrete and gypsite lithofacies in paleodrainage systems of inland Australia and their relationship to carnotite mineralization. *Journal of Sedimentary Research*, v. 52, n. 4, p. 1149-1170, 1982.

ARAÚJO, J. C.; RIBEIRO, M. R. Características de cambissolos do Baixio de Irecê (BA) e suas relações com a infiltração e disponibilidade de água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 18, n. 3, p. 521-527, 1994.

ARAÚJO, L. E.; SOUSA, F. A. S.; RIBEIRO, M. A. F. M.; SANTOS, A. S.; MEDEIROS, P. C. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.

ARAÚJO FILHO, J. A. Aspectos zo ecológicos e agropecuários do caprino e do ovino nas regiões semi-áridas. *Documentos*, n. 61. Sobral-CE: Embrapa Caprinos. 2006. 28 p.

ARISTARAIN, L. F. Chemical analyses of caliche profiles from the High Plains, New Mexico. *The Journal of Geology*, v. 78, n. 2, p. 201-212, 1970.

ASSOCIAÇÃO COMERCIAL INDUSTRIAL E AGROPECUÁRIA DE CAMPO FORMOSO - ACIACF. Cultura do sisal. Disponível em: <http://www.aciacf.com.br/site/index.php?lk=sisal>. Acesso em: 20 dez. 2019.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: características e processos associados. *Revista Geonomos*, v. 14, n. 2, 2006.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A.; COE, H. H. G. Distribuição espacial das voçorocas em Gouveia-MG: fatores associados. *Revista Geonorte*, v.1, n.4, p.634 – 647, 2012.

AULER, A. S. O calcário caatinga e os carbonatos secundários superficiais do Norte da Bahia: geocronologia e significado paleoambiental. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9, 2003. *Anais...* Recife: ABEQUA, 2003. v. 1.

AULER, A. S. Karst Evolution and Palaeoclimate in Eastern Brazil. 1999. 268 p. (Ph. D. Thesis) - University of Bristol. Bristol, 1999.

AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. Ambientes cársticos. In: SOUZA, C. R.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S; OLIVEIRA, P. E. (Ed.). *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto-SP: Holos, 2005. p. 321-342.

AULER, A. S.; SMART, Peter L. Late Quaternary paleoclimate in semiarid northeastern Brazil from U-series dating of travertine and water-table speleothems. *Quaternary Research*, v. 55, n. 2, p. 159-167, 2001.

AULER, A. S.; SMART, P.L.; TARLING, D.H.; FARRANT, A.R. Fluvial incision rates derived from magnetostratigraphy of cave sediments in the cratonic area of eastern Brazil. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 46: 391-403. 2002.

AVNI, Y. Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. *Catena*, v. 63, p. 185– 220. 2005.

AVNI, Y.; PORAT, N.; PLAKHT, J.; AVNI, G. Geomorphic changes leading to natural desertification versus anthropogenic land conservation in an arid environment, the Negev Highlands, Israel. *Geomorphology*, v. 82, n. 3-4, p. 177-200, 2006.

BAARTMAN, E. M.; VAN LYNDEN, G. W.; REED, M. S.; RITSEMA, C. J.; HESSEL, R. Desertification and land degradation: origins, processes and solution – A literature review. Desire Report Series. Wageningen-Netherlands: Scientific Report, 2007.

BACELLAR, L. A. P. Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá - Ouro Preto/MG. 2000. 226 f. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

BACHMAN, G. O.; MACHETTE, M. N. Calcic soils and calcretes in the southwestern United States. U.S Geological Survey, 1977. 163 p.

BAHIA. Governo do Estado. Plano de recursos hídricos e proposta de enquadramento dos corpos de água da bacia hidrográfica do rio Salitre: síntese executiva/PF03. Salvador: CBHS/SEMA/INEMA, 2017. 242 p.

BAHIA, GOVERNO DO ESTADO. Plano estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca – PAE/BA. INEMA/IICA/UEFS: Salvador-BA, 2014. 185 p.

BAHIA. Governo do Estado. Plano estadual de recursos hídricos do estado da Bahia: diagnóstico e regionalização. Salvador: Superintendência de Recursos Hídricos, 2003. 157 p. Relatório.

BAJNÓCZI, B.; KOVÁCS-KIS, V. Origin of pedogenic needle-fiber calcite revealed by micromorphology and stable isotope composition: a case study of a Quaternary paleosol from Hungary. *Chemie der Erde-Geochemistry*, v. 66, n. 3, p. 203-212, 2006.

BARBOSA, J. S.; SABATÉ, P.; MARINHO, M. M. O Cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n.1, p. 3-6, 2016.

BARTHES, B.; ROOSE, E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, v. 47, n. 2, p. 133-149, 2002.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J. Physical and hydraulic properties of a calcic horizon. *Soil Science*, v. 155, n. 6, p. 368-375, 1993.

BAYAT, O.; KARIMZADEH, H.; EGHBAL, M. K.; KARIMI, A.; AMUNDSON, R. Calcic soils as indicators of profound Quaternary climate change in eastern Isfahan, Iran. *Geoderma*, v. 315, p. 220-230, 2018.

BECERRIL-PIÑA, R.; MASTACHI-LOZA, C. A.; GONZÁLEZ-SOSA, E.; DÍAZ-DELGADO, C.; BÂ, K. M. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, v. 120, p. 4-13, 2015.

BECZE-DEÁK, J.; LANGOHR, R.; VERRECCHIA, E. P. Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction. *Geoderma*, v. 76, n. 3-4, p. 221-252, 1997.

BEHLING, H.; ARZ, H. W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Late Quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB 3104-1. *Quaternary Science Reviews*, v. 19, n. 10, p. 981-994, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. *Raega*, n. 8, p.141-152, 2004.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale: esquisse méthodologique. In : BERTRAND, G.; TRICART, J. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, v. 39, n. 3, 1968. p. 249-272.

BEZERRA, F. H.; NEVES, B. B. B.; CORRÊA, A. C.; BARRETO, A. M.; SUGUIO, K. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology*, v. 97, n. 3-4, p. 555-582, 2008.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. Calcrosta (Caliche), Gênese das Calcrostras, Crostas de Gipso (Gipcrosta), Silcrosta, Silicificação. In: BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Florianópolis: Editora da UFSC, v. 2, 1996. p. 704-744.

BIGARELLA, J. J.; ANDRADE, G. O. Contribution to the study of the Brazilian Quaternary. *Geological Society of America, Special Paper*, v. 84, p. 433-451, 1965.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R. Considerações a respeito dos terraços fluviais, rampas de colúvios e várzeas. *Boletim Paranaense de Geografia*, p. 153-197, 1965.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Boletim Paranaense de Geografia*, n. 16/17, p. 117-151, 1965.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERMANN, M. L. P.; SANTOS, G. F.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Florianópolis: Ed. UFSC, 2003. v. 3. p. 877-1436.

BLUM, M. D.; TOOMEY III, R. S.; VALASTRO JR, S. Fluvial response to Late Quaternary climatic and environmental change, Edwards Plateau, Texas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 108, n. 1-2, p. 1-21, 1994.

BOERO, V.; SCHWERTMANN, U. Iron oxide mineralogy of terra rossa and its genetic implications. *Geoderma*, v. 44, n. 4, p. 319-327, 1989.

BOGAART, P. W.; VAN BALEN, R. T.; KASSE, C.; VANDENBERGHE, J. Process-based modelling of fluvial system response to rapid climate change - I: model formulation and generic applications. *Quaternary Science Reviews*, v. 22, p. 2077-2095, 2003.

BORGES, S. V. F.; BALSAMO, F.; VIEIRA, M. M.; IACUMIN, P.; SRIVASTAVA, N. K.; STORTI, F.; BEZERRA, F. H. R. Pedogenic calcretes within fracture systems and beddings in

Neoproterozoic limestones of the Irecê Basin, northeastern Brazil. *Sedimentary geology*, v. 341, p. 119-133, 2016.

BOULET, R. Análise estrutural da cobertura pedológica e cartografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21, 1988, Campinas. A responsabilidade social da ciência do solo. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988, p. 79-90.

BOULET, R. CHAUVEL, A.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et Cartographie en pédologie: I - Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cahiers de ORSTOM*, v. 19, n. 4, p. 309-321, 1982.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. Tradução Igo Fernando Lepsch. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 683p.

BRANNER, J. C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 22, p. 187-206, 1911.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil. Brasília: MMA, 2007. 134 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Grupo de trabalho interministerial para redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas. Brasília-DF: MI/MMA, 2005. 114p. Relatório Final.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Grupo de trabalho para delimitação do semiárido. Brasília-DF: MI, 2017. 424p. Relatório Final.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos/MMA, 2004. 213 p.

BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, R. A.; CAMPANHA, G. A. C. A discordância angular e erosiva entre os grupos Chapada Diamantina e Bambuí (Una) na folha Mirangaba-Bahia. *Geologia USP. Série Científica*, v. 12, n. 2, p. 99-114, 2012.

BROCK, A. L.; BUCK, B. J. Polygenetic development of the Mormon Mesa, NV petrocalcic horizons: Geomorphic and paleoenvironmental interpretations. *Catena*, n. 77, 2009, p. 65-75.

CAETANO, F. A. O.; GONÇALVES, D. S. L.; FEITOSA, M. M.; TEIXEIRA, R. N.; LEMOS, J. J. S. Desertificação no Nordeste brasileiro: uma análise das vulnerabilidades socioeconômicas do município de Irauçuba/CE. *Espacios*, v. 38, n. 39, p. 14 – 25, 2017.

CALVET, F., JULIÀ, R. Pisoids in the caliche profiles of Tarragona (NE Spain). In: PERYT, T. M. (Ed.). *Coated Grains*. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 73-79.

CANDY, I.; BLACK, S. The timing of Quaternary calcrete development in semi-arid southeast Spain: investigating the role of climate on calcrete genesis. *Sedimentary Geology*, v. 218, n. 1-4, p. 6-15, 2009.

CAO, S.; LIU, Y.; YU, Z. China's successes at combating desertification provide roadmap for other nations. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, v. 60, n. 2, p. 16-24, 2018.

CAPEZZUOLI, E.; GANDIN, A.; PEDLEY, M. Decoding tufa and travertine (freshwater carbonates) in the sedimentary record: the state of the art. *Sedimentology*, v. 61, n. 1, p. 1-21, 2014.

CAPOZZI, F.; DI PALMA, A.; DE PAOLA, F.; GIUGNI, M.; IAVAZZO, P.; TOPA, M. E.; ADAMO, P.; GIORDANO, S. Assessing desertification in sub-Saharan peri-urban areas: Case study applications in Burkina Faso and Senegal. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 190, p. 281-291, 2018.

CARLINI, B. S. Uso de sensoriamento remoto e reconhecimento pedológico para identificação de ambientes na sub-bacia do rio Pacuí, submédio São Francisco. 2013. 168f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2013.

CARVALHO FILHO, A. D.; CURI, N.; MARQUES, J. D. S.; SHINZATO, E.; FREITAS, D. A. F.; JESUS, E. A.; MASSAHUD, R. T. L. R. Óxidos de manganês em solos do quadrilátero ferrífero (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 793-804, 2011.

CASSETI, V. Geomorfologia. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em 20/01/2016.

CASTRO, M. R. Estratigrafia de Seqüências na Formação Tombador, Grupo Chapada Diamantina, Bahia. 2003. 122f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2003.

CASTRO, S. S. Erosão hídrica na alta bacia do rio Araguaia: distribuição, condicionantes, origem e dinâmica atual. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 17, p. 38-60, 2005.

CASTRO, S. S.; COOPER, M. Fundamentos de micromorfologia de solos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 240 p.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil. CGEE: Brasília/DF, 2016. 251 p.

CHAPLOT, V.; LE BROZEC, E. C.; SILVERA, N.; VALENTIN, C. Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of northern Laos. *Catena*, v. 63, n. 2-3, p. 167-184, 2005.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG Bulletin*, v. 54, n. 2, p. 207-250, 1970.

CHRISTIAN, B. A.; DHINWA, P. S.; AJAI. Long term monitoring and assessment of desertification processes using medium & high-resolution satellite data. *Applied geography*, v. 97, p. 10-24, 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1980.

CONTI, J. B. *Clima e meio ambiente*. São Paulo: Atual, 1998. 88 p.

CORRÊA, A. C. B. *Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil*. 386 f. 2001. Tese (Doutorado) IGCE - Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2001.

CORRÊA, A. C. B.; SILVA, D. G.; MELO, J. S. Utilização dos depósitos de encostas dos brejos pernambucanos como marcadores paleoclimáticos do quaternário tardio no semi-árido nordestino. *Mercator*, v. 7, n. 14, p. 99 a 125, 2008.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Geodiversidade do estado da Bahia*. Arquivo vetorial – mapeamento geológico na escala 1:1.000.000. 2010. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/14691>. Acesso 05 fev. 2019.

CRISTALLI, P. S. *Macrofitofósseis em tufos calcários quaternários do norte da Bahia como indicadores paleoclimáticos*. 2006. 208 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade de São Paulo. 2006.

CUNHA, T. J. F.; SILVA, F. H. B. B.; SILVA, M. S. L.; PETRERE, V. G.; SÁ, I. B.; OLIVEIRA NETO, M. B.; CAVALCANTI, A. C. *Solos do submédio do vale do São Francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola*. Embrapa Semiárido. Documentos 211. 2008.

CUNHA, T. J. F.; RIBEIRO, L. P. *Qualidade e relações pedogenéticas da matéria orgânica de alguns solos da região de Irecê (BA)*. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 22, n. 4, p. 693-704, 1998.

CUNHA, T. J. F.; RIBEIRO, L. P.; SANTOS, H. G.; GOMES, I. A.; SANTOS, R. D. *Estudo de correlação de solos para fins de classificação nas regiões do recôncavo baiano e microrregião de Irecê-Bahia*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.9, 2000, 49 p.

CURI, N.; KAMPF, N. *Caracterização do Solo*. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. *Pedologia: fundamentos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012, p. 147-169.

CZAPLEWSKI, Nicholas J.; CARTELLE, Cástor. *Pleistocene bats from cave deposits in Bahia, Brazil*. *Journal of Mammalogy*, v. 79, n. 3, p. 784-803, 1998.

DAL' BÓ, P. F. F.; BASILICI, G. *Estimativas de paleoprecipitação e gênese de feições cálcicas e argílicas em paleossolos da Formação Marília (Neocretáceo da Bacia Bauru)*. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 29, n. 1, p. 33-47, 2010.

DAL' BÓ, P. F. F.; BASILICI, G.; ANGELICA, R. S.; LADEIRA, F. S. B. *Paleoclimatic interpretations from pedogenic calcretes in a Maastrichtian semi-arid eolian sand-sheet palaeoenvironment: Marília Formation (Bauru Basin, southeastern Brazil)*. *Cretaceous Research*, v. 30, n. 3, p. 659-675, 2009.

DALTON DE SOUZA, J. D. D.; FERNANDES FILHO, J.; GUIMARÃES, J. T.; LOPES, J. N. *Projeto Colomi. Geologia da Região do Medio São Francisco*, 1979. 389 p. Relatório.

DALTON DE SOUZA, J.; KOSIN, M.; MELO, R. C.; SANTOS, R. A.; TEIXEIRA, L. R.; SAMPAIO, A. R.; GUIMARÃES J. T.; ...; ANGELIM, L. A. A. 2003. Mapa geológico do Estado da Bahia – Escala 1:1.000.000. Salvador: CPRM, 2003. Versão 1.1. Programas Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Convênio de Cooperação e Apoio Técnico-Científico CBPM/CPRM.

DAVIS, C.; CÂMARA, G. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001.

DE OLIVEIRA, P. E.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Late Pleistocene/Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian caatinga: the fossil dunes of the middle São Francisco River. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, v. 152, n. 3-4, p. 319-337, 1999.

DE OLIVEIRA, P. E.; PESSENDA, L. C. R.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, E. V.; SANTOS, J. C. D. Paleoclimas da caatinga brasileira durante o quaternário tardio. In: CARVALHO, I. S.; GARCIA, M. J.; LANA, C. C.; STROHSCHOEN J. R. (Ed.). *Paleontologia - cenários da vida – paleoclimas*. Interciência, v. 5, p. 501 - 516, 2014.

DESCROIX, L.; BARRIOS, J. G., VIRAMONTES, D.; POULENARD, J.; ANAYA, E.; ESTEVES, M.; ESTRADA, J. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. *Catena*, v. 72, n. 3, p. 325-339, 2008.

DEVER, L.; FONTES, J. C.; RICHÉ, G. Isotopic approach to calcite dissolution and precipitation in soils under semi-arid conditions. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, v. 66, n. 3-4, p. 307-314, 1987.

DHARUMARAJAN, S.; LALITHA, M.; VASUNDHARA, R.; HEGDE, R. The Major Biophysical Indicators of Desertification in Arid and Semi-arid regions of India. *Agropedology (Nagpur)*, v. 26, p. 189-197, 2016.

DIAS, C. D. V.; KIILL, L. Levantamento florístico da reserva legal do Projeto Salitre, Juazeiro-BA. Documentos 209. Petrolina-PE: Embrapa Semiárido. 2008. 22 p.

DIEST, A. van. Factors affecting the availability of potassium in soils. In: IPI Research Topics n. 5 - Potassium in the Soil/Plant Root System. Worblaufen-Bern-Switzerland: International Potash Institute, 1980. p. 37-59.

DIXON, J. C. Duricrusts. In: ABRAHAMAS, A. D.; PARSONS, A. J. (Ed.). *Geomorphology of desert environments*. London, Chapman and Hall, 1994, p. 64–81.

D'ODORICO, P.; BHATTACHAN, A.; DAVIS, K. F.; RAVI, S.; RUNYAN, C.W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, v. 51, p. 326–344, 2013.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. M. (Org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

DONER, H. E.; LYNN, W. C. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed). Mineral in soil environments. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989, p. 279-330.

DOURADO, C. D. S. Áreas de risco de desertificação: cenários atuais e futuros, frente às mudanças climáticas. 2017. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2017.

DOURADO, J. A. L. Das terras do sem fim aos territórios do agrohidronegócio: conflitos por terra e água no vale do São Francisco. 2015. 361 f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, 2015.

DRUMOND, M. A.; KIILL, L. H. P.; LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, M. C.; OLIVEIRA, V. R.; ALBUQUERQUE, S. G.; NASCIMENTO, C. E. S.; CAVALCANTI, J. Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da caatinga. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L. V. (Orgs.) Biodiversidade da caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília-DF: MMA/UFPE/Embrapa Semi-árido, 2003, p. 330-340.

DUCLOUX, J.; LAOUINA, A. The pendent calcretes in semi-arid climates: an example located near Taforalt, NW Morocco. *Catena*, v. 16, n. 3, p. 237-249, 1989.

DURAND, N; MONGER, H. C; CANTI, M. G. Calcium Carbonate Features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.). Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 149-194.

EGHBAL, M. K.; SOUTHARD, R. J. Stratigraphy and genesis of Durorthids and Haplargids on dissected alluvial fans, western Mojave Desert, California. *Geoderma*, v. 59, p. 151–174. 1993.

ELORZA, M. G; MARTÍNEZ, V. H. S. Multiple talus flatirons, variations of scarp retreat rates and the evolution of slopes in Almazán Basin - semi-arid central Spain. *Geomorphology*, v. 38, n. 1-2, p. 19-29, 2001.

EMADI, M.; BAGHERNEJAD, M.; MEMARIAN, H.; SAFFARI, M.; FATHI, H. Genesis and Clay Mineralogical Investigation of Highly Calcareous Soils in Semi-Arid Regions of Southern Iran. *Journal of Applied Sciences*, v. 8, p. 288-294, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Solos do Nordeste - Levantamentos de solos dos Estados do Nordeste em escalas variando de 1:400.000 a 1:1.000.000. Embrapa Solos - UEP Recife, 2006. Disponível em [www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html](http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.html). Acesso em 18 de abril de 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. EMBRAPA Monitoramento por Satélite/CNPM: Disponível em [https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao\\_srtm.html](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_srtm.html). Acesso em: 20/01/2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Registro de observações meteorológicas – dados históricos da estação Salitre. Petrolina-PE: Embrapa

Semiárido. Disponível em: <<http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/estacoes/index.html>>. Acesso em: 05 jan. 2020.

ESTEBAN, M.; KLAPPA, C. F. Subaerial Exposure Environment - Parte 1. In: CHOLLE, P. A.; BEBOUT, D. G.; MOORE, C. H. Carbonate Depositional Environments. American Association of Petroleum Geologists: Tulsa-Okla., 1983. p. 1 – 54.

EVANGELISTA, A. R. S. O processo de desmatamento do bioma caatinga: riscos e vulnerabilidades socioambientais no território de identidade do sisal, Bahia. *Revista Geográfica de América Central*, v. 2, n. 47, p. 1-13, 2011.

FABRICANTE, J. R.; ARAÚJO, K. C. T.; MANFIO, M.; SIQUEIRA FILHO, J. A. Mortalidade de mudas de espécies nativas sob efeito do pastejo de caprinos, ovinos e emas: implicações para projetos de recuperação/restauração de áreas degradadas na caatinga. *Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais*, v.5, n.6, p. 410-413, 2017.

FERREIRA, E. P. Gênese e Classificação de Solos em Ambiente Cárstico na Chapada do Apodi. 107 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FERREIRA, C.; MOREIRA-NORDEMANN, L. M.; NORDEMANN, D. J. A radioatividade natural da região de Irecê, BA. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 2, p. 167-174, 1992.

FERREIRA, E. P.; ANJOS, L. H. C. D.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; CIPRIANO-SILVA, R.; AZEVEDO, A. C. Genesis and classification of soils containing carbonate on the Apodi Plateau, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, 2016.

FIGUEIREDO, F. T. Fácies sedimentares e proveniência da Formação Bebedouro, Neoproterozóico – BA. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotécnica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo: São Paulo, 2008.

FILIZOLA, H. F.; BOULET, R.; GOMES, M. A. F. Processos erosivos lineares em áreas de recarga do Aquífero Guarani. In: HAMADA, E. (Ed.). *Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios*. Jaguariúna-SP: Embrapa Meio Ambiente, 2003. p. 1-19.

FILIZOLA, H. F.; GOMES, A. F. Introdução à descrição micromorfológica de lâminas delgadas de solos - Parte 1. Comunicado Técnico 41 – EMBRAPA: Jaguariúna-SP, 2006.

FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. *Pedologia: fundamentos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2012, p. 171-205.

FORD, D.; WILLIAMS, P. D. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, 2007. 576 p.

FORD, T. D.; PEDLEY, H. M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews*, v. 41, n. 3-4, p. 117-175, 1996.

FREITAS, M. M. Evolução da paisagem geomorfológica. In: RUA, J. (Org.). Paisagem, espaço e sustentabilidade: uma perspectiva multidimensional da geografia. Rio de Janeiro: Editora PUC Rio, p. 91-128, 2007.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; VIEIRA, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 1283-1296, 2008.

GEORGEN, P. G.; DAVIS-CARTER, J.; TAYLOR, H. M. Root growth and water extraction patterns from a calcic horizon. *Soil Science Society of America Journal*, v. 55, n. 1, p. 210-215, 1991.

GERRARD, J. Soil geomorphology: present dilemmas and future challenges. *Geomorphology*, n. 7, p. 61-84, 1993.

GEYIK, M. P. Gully Control. In: FAO watershed management field manual. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/006/ad082e/ad082e01.htm>. Acesso em 14 de janeiro de 2019.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GILE, L. H.; PETERSON, F.F.; GROSSMAN, R.B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science*, n. 101, p. 347-354, 1966.

GIRÃO, R. D. O.; MOREIRA, L. J. D. S.; GIRÃO, A. L. D. A.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O. Soil genesis and iron nodules in a karst environment of the Apodi Plateau. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, n. 4, p. 683-695, 2014.

GONÇALO FILHO, F. Avaliação de técnicas de manejo da caatinga através da análise dos atributos físicos e químicos do solo. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró-RN, 2015.

GONÇALVES, E. L. Opara: formação histórica e social do submédio São Francisco. Petrolina: Gráfica Franciscana, 1997. 249 p.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 17 - 55.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 149-209.

GUIMARÃES, J. T. A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação. 1996. 235 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 1996.

GUIMARÃES, J. T.; ALKMIN, F. F.; CRUZ, S. C. P. Supergrupo Espinhaço e São Francisco. In: BARBOSA, J. S. F. (Org.). Geologia da Bahia: pesquisa e atualização. Série Publicações Especiais. Salvador: CBPM, 2012. p. 33-85.

GUNN, J. Encyclopedia of caves and karst science. New York-NY: Taylor & Francis, 2004. 1940 p.

GUNNELL, Y.; BOURGEON, G. Soils and climatic geomorphology on the Karnataka Plateau, peninsular India. *Catena*, v. 29, n. 3-4, p. 239-262, 1997.

GURGEL, S. P.; BEZERRA, F. H.; CORRÊA, A. C. B.; MARQUES, F. O.; MAIA, R. P. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. *Geomorphology*, v. 186, p. 68-84, 2013.

HARDT, R. Aspectos da morfologia cárstica da Serra do Calcário/Cocalinho–MT. 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 2004.

HARMAN, R.; GALLAGHER, K.; BROWN, R.; RAZA, A.; BIZZI, L. Accelerated denudation and tectonic/geomorphic reactivation of the cratons of northeastern Brazil during the Late Cretaceous. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 103, n. B11, p. 27091-27105, 1998.

HOFFMANN, R. Determinantes da insegurança alimentar no Brasil: análise dos dados da PNAD de 2004. *Segurança alimentar e nutricional*, v. 15, n. 1, p. 49-61, 2008.

HUANG, S.; SIEGERT, F. Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. *Journal of Arid Environments*, v. 67, n. 2, p. 308-327, 2006.

HUDSON, N. W. An introduction to the mechanics of soil erosion under conditions of subtropical rainfall. *Rhodesia Science Association Proceedings*, v. 49, p. 14-25, 1961.

HUON, S.; BELLANGER, B.; BONTE, P.; SOGON, S.; PODWOJEWSKI, P.; GIRARDIN, C.; ...; MARIOTTI, A. Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers, two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes (Laos, Venezuela). In: ROOSE, E. J.; LAL, R.; FELLER, C.; BARTHES, B. STEWART, B. A. *Advances in Soil Science: Soil erosion and carbon dynamics*. Boca Raton-FL: CRC Press, 2005. p. 301-328.

IBARROLA-RIVAS, M. J. Sustainability analysis of agave production in Mexico. 2010. 57 f. Thesis (Master Programme Energy and Environmental Sciences) - Center for Energy and Environmental Studies, University of Groningen, Groningen-Netherlands, 2010.

IMESON, A. C.; KWAAD, F. J. P. M. Gully types and gully prediction. *Geografisch Tijdschrift*, v. 14, n. 5, p. 430-441, 1980.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Brasil em síntese – informações sobre os municípios do Brasil. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 nov. 2020.

\_\_\_\_\_. Censo demográfico: tabelas. 2010. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=resultados>. Acesso em: 01 nov. 2020.

\_\_\_\_\_. Mapeamento sistemático topográfico, arquivos vetoriais. 1999. Disponível em [ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/folhas\\_topograficas/vetoriais](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/folhas_topograficas/vetoriais). Acesso em: 20 set. 2017.

\_\_\_\_\_. Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente. Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais/IBGE, 2002. 300p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Peixe-Parapanema. São Paulo, 1986. Relatório.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA - INEMA. Monitoramento da qualidade das águas da RPGA do Rio Salitre - Programa Monitora, relatório da 2ª Campanha 2008. Salvador: Governo do Estado da Bahia, 2008. 31p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Imagem do Satélite CBERS-4 (Sensor Pancromático com 5m de resolução espacial – Banda 01). Cena 152/111, datada de 16 julho de 2019. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo>. Acesso em 18 de fevereiro de 2020.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA. Sistema de Avaliação da Desertificação. MCTI. Disponível em: [https://sades.insa.gov.br/layers/geonode:analf/metadata\\_detail](https://sades.insa.gov.br/layers/geonode:analf/metadata_detail). Acesso em: 25 nov. 2020a.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO – INSA. Sistema de Avaliação da Desertificação. MCTI. IDHM dos municípios do semiárido. Disponível em: <http://sigsab.insa.gov.br/basico>. Acesso em: 25 nov. 2020b.

JACKS, G.; SHARMA, V. P. Geochemistry of calcic horizons in relation to hillslope processes, southern India. *Geoderma*, v. 67, n. 3-4, p. 203-214, 1995.

JANSSEN, A.; SWENNEN, R.; PODOOR, N.; KEPPENS, E. Biological and diagenetic influence in Recent and fossil tufa deposits from Belgium. *Sedimentary Geology*, v. 126, n. 1-4, p. 75-95, 1999.

JENNINGS, J. N. 1985. *Karst Geomorphology*. Oxford: Basil Blackwel. 281p.

JIANG, Z.; LIAN, Y.; QIN, X. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, v. 132, p. 1-12, 2014.

KAGEYAMA, A.; HOFFMANN, R. Pobreza no Brasil: uma perspectiva multidimensional. *Economia e Sociedade*, v. 15, n. 1, p. 79–112, 2006.

KAMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução dos solos: pedogênese. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. *Pedologia: fundamentos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012, p. 207-302.

KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de Solos Brasileiros. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. *Pedologia: fundamentos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012, p. 81–145.

KARAMESOUTI, M.; PANAGOS, P.; KOSMAS, C. Model-based spatio-temporal analysis of land desertification risk in Greece. *Catena*, v. 167, p. 266-275, 2018.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. FAIRCHILD, T. R. TAIOLI, F. (Org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 113-138.

KEAY-BRIGHT, J.; BOARDMAN, J. The influence of land management on soil erosion in the Sneeuwberg Mountains, Central Karoo, South Africa. *Land Degradation and Development*, v. 18, p. 423-439, 2007.

KHAN, F. A.; FENTON, T. E. Saturated zones and soil morphology in a Mollisol catena of central Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, n. 5, p. 1457-1464, 1994.

KHANAMANI, A.; FATHIZAD, H.; KARIMI, H.; SHOJAEI, S. Assessing desertification by using soil indices. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 10, n. 13, p. 287, 2017.

KHORMALI, F.; ABTAHI, A. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. *Clay minerals*, v. 38, n. 4, p. 511-527, 2003.

KHORMALI, F.; ABTAHI, A.; MAHMOODI, S; STOOPS, G. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*, v. 53, p. 273-301, 2003.

KHORMALI, F.; ABTAHI, A.; STOOPS, G. Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma*, v. 132, n. 1-2, p. 31-46, 2006.

KHRESAT, S. A. Calcic horizon distribution and soil classification in selected soils of northwestern - Jordan. *Journal of Arid Environments*. n. 47, p. 145-152, 2001.

KING, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, v.18, n. 2, p. 147-265, 1956.

KING, L. C. Canons of landscape evolution. *Bulletin of Geological Society America*, v. 64, p. 721-752, 1953.

KNOX, J. C. Valley alluviation in southwestern Wisconsin. *Annals of the Association of American Geographers*, v.62, p.401-410, 1972.

KOVDA, I. V.; MORGUN, E. G.; LEBEDEVA, M. P.; OLEINIK, S. A.; SHISHKOV, V. A. Identification of carbonate pedofeatures of different ages in modern chernozems. *Eurasian Soil Science*, v. 49, n. 7, p. 807-823, 2016.

KUHN, P.; J. AGUILAR; R. MIEDEMA. Textural pedofeatures and related horizons. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 217-250.

KULIK, K. N.; RULEV, A. S.; YUFEREV, V. G. Geoinformation analysis of desertification hotspots in Astrakhan oblast. *Arid ecosystems*, v. 3, n. 3, p. 184-190, 2013.

LANDAU, D. P.; BINDER, K. A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics. Ed. New York: Cambridge University Press, 2014. 471 p.

LAQUINI, J. P. Modelagem determinístico-estocástica da dinâmica de sedimentos em reservatórios de água e de rejeitos de mineração. 2009. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

LE BISSONNAIS, Y.; BENKHADRA, H.; CHAPLOT, V.; FOX, D.; KING, D.; DAROUSSIN, J. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m<sup>2</sup> to small catchments. *Soil and Tillage Research*, v. 46, n. 1-2, p. 69-80, 1998.

LEÃO, Z. M.; DOMINGUEZ, J. M. L. Plataformas carbonáticas Pré-Cambrianas: o exemplo da Formação Salitre, Proterozóico Superior, Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 4, p. 407-421, 1992.

LEITE, M. L.; ADACHESKI, P. A.; VIRGENS FILHO, J. S. Estudo da variabilidade da precipitação pluvial em municípios da região sul dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 6, p. 135-150, 2010.

LEMOES, M. S. S.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SOBRINHO, F. E. Evaluation of characteristics of Cambisols derived from limestone in low tablelands in northeastern Brazil: implications for management. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 32, n.8, p. 825-834, 1997.

LI, Y. B.; SHAO, J. A.; YANG, H.; BAI, X. Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, v. 57, n. 3, p. 621-627, 2009.

LIMA, F. J.; PAISANI, J. C.; CORRÊA, A. C. B.; PONTELLI, M. E. Micromorfologia de colúvios em sequencias pedoestratigráfica e litoestratigráfica—o caso das superfícies de Palmas/Água Doce (sul) e planalto sedimentar do Araripe (nordeste do Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 2, 2017

LINDBO, D. L.; STOLT, M. H.; VEPRASKAS, M. J. Redoximorphic Features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 129-147.

LOCH, C. A interpretação de imagens aéreas: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais. 4. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 2001. 118 p.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Índice de aridez e tendência a desertificação para estações meteorológicas nos estados da Bahia e Pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 17, n. 11, p. 155-152, 2015.

LOPES, L. S. O.; SOARES, R. C. Suscetibilidade à desertificação das terras secas de Gilbués (Estado do Piauí) e Cabrobó (Estado do Pernambuco), Nordeste do Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, v. 1, n. 56, p. 307-323, 2016.

LYNCH, L. D. S. Gênese e geoquímica de solos em ambiente cárstico no cerrado da região de Planaltina de Goiás. 2009. 156f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2009.

MABESOONE, J. M.; ROLIM, J. L.; CASTRO, C. Late Cretaceous and Cenozoic history of Northeastern Brazil. *Geologie en Mijnbouw*, v. 56, n. 2, p. 129-139. 1977.

MACÊDO, E. P.; NEVES, J. P.; PEREIRA, L.H. M.; MACÊDO, L. L.; MOTA, E. L.; SANTIAGO, R. C.; LOUREIRO, H. S. C. Carta Geológica, folha SC.24-V-C-VI (Campo dos Cavalos) Escala 1:100.000. Salvador: CPRM, 2014.

MACHETTE, M. N. Calcic soils of southwestern United States. In: Weide, D. L. (Ed.), *Soil and Quaternary Geology of the Southwestern United States*. GSA Special Paper, Geological Society of America, v. 203, p. 1-21. 1985.

MACK, G. H.; COLE, D. R. TREVINO, L. 2000. The distribution and discrimination of shallow, authigenic carbonate in the Pliocene–Pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande rift. *Geological Society of America Bulletin*, v. 112, n. 5, p. 643-656, 2000.

MAINGUET, M. Stratégies de combat contre la dégradation de l'environnement dans les écosystèmes secs; les réponses des Nations-Unies, de la CEI; de la Chine et du Sahel (Strategies to combat environmental degradation in dry ecosystems: answers of the United Nations, the Sahelians countries of Africa, the CEI, China and the Sahel). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, v. 69, n. 5, p. 422-433, 1992.

MANN, A. W.; HORWITZ, R. C. Groundwater calcrete deposits in Australia some observations from Western Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, v. 26, n. 5-6, p. 293-303, 1979.

MARANHÃO, D. D. C.; PEREIRA, M. G.; COLLIER, L. S., ANJOS; L. H. C. D., AZEVEDO, A. C.; CAVASSANI, R. D. S. Genesis and classification of soils containing carbonates in a topequence of the Bambuí Group. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*, v. 1, p. 383-422, 2011.

MATALLO JUNIOR, H. Desertificação: histórico e perspectivas. Brasília: UNESCO, 2001. 80 p.

MATALLO JUNIOR, H. Glossário de termos e conceitos usados no contexto da UNCCD. Brasília: MMA, 2009. 154p.

MEDEIROS, Y. D. P.; GONÇALVES, M. S. Plano de gerenciamento integrado da bacia do rio Salitre: Subprojeto 3.3.B. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2003. 84 p. Relatório.

MELLO, J. W. V.; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). *Química e mineralogia do solo: parte I - conceitos básicos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 151-249.

MELO, M. S.; CLAUDINO-SALES, V.; PEULVAST, J.; SAADI, A.; MELLO, C. L. Processos e produtos morfogenéticos continentais. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.;

OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. Quaternário do Brasil. São Paulo: Abequa Holos, 2005. p.258-275.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F (Ed.). MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). Química e mineralogia do solo: parte I - conceitos básicos. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 252-332.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M.; Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P.R; ALMEIDA T. (Coordenadores). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UNB/CNPQ, 2012. p. 191- 208.

MENEZES, H. E. A; BRITO, J. I. B; LIMA, R. A. F A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi, v. 14, n. 2, p. 181–186, 2010.

MESQUITA, L. F. Gênese e geoquímica de solos influenciados por carbonatos na faixa atlântica do sudeste brasileiro. 2015. 208 f. Tese (Doutorado em Solos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015.

MIKO, S.; DURN, G.; PROHIĆ, E. Evaluation of terra rossa geochemical baselines from Croatian karst regions. Journal of Geochemical Exploration, v.66, p. 173–182, 1999.

MILLOT, G. Géochimie de la surface et formes du relief: présentation. Sciences Géologiques, bulletins et mémoires, v. 30, n. 4, p. 229-233, 1977.

MILLOT, G. Planation of continents by intertropical weathering and pedogenetic process. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESS, 2., 1982, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IGCP; IAGC, 1983. p. 53-63.

MILNES, A. R. Calcrete. In: MARTINI, I. P.; CHESWORTH, W. (Eds.). Developments in Earth Surface Processes. Elsevier, v. 2, 1992. p. 309-347.

MISI, A.; SILVA, M. G. Chapada Diamantina Oriental - Bahia: geologia e depósitos minerais. Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996. 194 p. (Série Roteiros Geológicos).

MOAZALLAHI, M.; FARPOOR, M. H. Soil micromorphology and genesis along a climotoposequence in Kerman Province, Central Iran. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 3, n. 4, p. 4078-4084, 2009.

MOEYERSONS, J. Ravine formation on steep slopes: forward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda. Catena, v. 18, n. 3-4, p. 309-324, 1991.

MOLINA, A.; GOVERS, G.; VANACKER, V.; POESEN, J.; ZEELMACKERS, E.; CISNEROS, F. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: interaction of vegetation cover and land use. Catena, v. 71, p. 357–370, 2007.

- MONGER, H. C.; DAUGHERTY, L. A.; LINDERMAN, W. C.; LIDDELL, C. M. Microbial precipitation of pedogenic calcite. *Geology*, v. 19, n. 10, p. 997-1000, 1991.
- MORAES FILHO, O.; SANTANA, A. C.; PEREIRA, L. H. M.; BRUNI, D. C.; SILVA, P. E. L. D. Projeto Morro do Gomes. Salvador-BA: CPRM, 1978. 93 p. Relatório Final.
- MOREIRA A.; FRANCHINI J. C.; MORAES L. A. C.; MALAVOLTA E. Disponibilidade de nutrientes em vertissolo calcário. Brasília: Pesq Agropec Bras, v. 35, n. 10, p. 2107-2013, 2000.
- MORGAN, R. P. C. Field studies of sediment transport by overland flow. *Earth Surface Processes*, v. 5, n. 4, p. 307-316, 1980.
- MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J.; ROMERO, R. E.; MOTA, F. O. B.; LIBARDI, P. L. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi - RN. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n.3, p. 445-454, 2007.
- MOURA, C. R. W.; ESCOBAR, G. C. J.; ANDRADE, K. M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 267-280, 2013.
- MOURA, J. R. S.; SILVA, T. M. Complexo de rampas de colúvios. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. *Geomorfologia do Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2001. p. 143 – 180.
- MÜCHER H.; VAN STEIJN, H.; KWAAD, F. Colluvial and mass wasting deposits. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 37-48.
- NACE, T. E.; BAKER, P. A.; DWYER, G. S.; SILVA, C. G.; RIGSBY, C. A.; BURNS, S. J.; ZHU, J. The role of North Brazil Current transport in the paleoclimate of the Brazilian Nordeste margin and paleoceanography of the western tropical Atlantic during the late Quaternary. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, v. 415, p. 3-13, 2014.
- NAIME, U. J.; CARVALHO JÚNIOR, W. D.; AMARAL, F. C. S.; CUNHA, T. J. F.; SILVA, E. F.; OLIVEIRA NETO, M. B.; FERNANDES, L. A. C. Levantamento de Reconhecimento de Baixa Intensidade dos Solos do Entorno do Projeto Salitre – Juazeiro/BA. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*- 118. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 101 p.
- NORDT, L. C.; HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; BOUTTON, T. W. Quantifying pedogenic carbonate accumulations using stable carbon isotopes. *Geoderma*, v. 82, n. 1-3, p. 115–136, 1998.
- NASCIMENTO, F. R. O fenômeno da desertificação. Goiânia: UFG, 2013. 244p.
- NASCIMENTO, H. M. A convivência com o semi-árido e as transformações socioprodutivas na região do Sisal-Bahia: por uma perspectiva territorial do desenvolvimento rural. *Campo-Território: Revista de Geografia Agrária*, v. 3, n. 6, p. 22-44, 2008.
- NEARING, M. A.; YIN, S. Q.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: an historical review. *Catena*, v. 157, p. 357-362, 2017.

NICHOLLS, J. R.; STEPHENSON, D. J. Monte Carlo modelling of erosion processes. *Wear*, v. 186, p. 64-77, 1995.

NAVONE S. M.; BARGIELA, M.; MAGGI, A.; MOVIA, C. P. Indicadores biofísicos de desertificação en el noroeste argentino: desarrollo metodológico. In: ABRAHAM, E. M.; BEEKMAN, G. B. (Ed.). *Indicadores de la desertificación para América del Sur: recopilación y armonización de indicadores y puntos de referencia de la desertificación a ser utilizados en el programa "Combate a la desertificación y mitigación de los efectos de la sequía en América del Sur"*. Mendoza: Martín Fierro, 2006, p. 103 – 111.

NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363p.

OLIVEIRA, C. N. D.; CAMPOS, V. P.; MEDEIROS, Y. D. P. Avaliação e identificação de parâmetros importantes para a qualidade de corpos d'água no semiárido baiano - estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Salitre. *Revista Química Nova*, v. 33, n. 5, p. 1059-1066, 2010.

OLIVEIRA, D. Capturas fluviais como evidências da evolução do relevo: uma revisão bibliográfica. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 20, p. 37-50, 2010.

OLIVEIRA, C. V.; KER, J. C.; CURI, N.; DUARTE, M. N.; FONTES, L. E. F. Caracterização de concreções ferro-manganosas de solos de calcário no norte do Estado de Minas Gerais. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 25, n. 3, 2001.

OLIVEIRA, C. V.; KER, J. C.; FONTES, L. E. F.; CURI, N.; PINHEIRO, J. C. Química e mineralogia de solos derivados de rochas do Grupo Bambuí no norte de Minas Gerais. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 22, n. 4, p. 583-593, 1998.

OLIVEIRA, D. P. Gênese de cambissolos desenvolvidos de rocha calcária na Chapada do Apodi-CE. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2012.

OLIVEIRA, D. P.; SARTOR, L. R.; SOUZA JÚNIOR, V.; CORREA, M. M.; ROMERO, R. E.; ANDRADE, G. R. P.; FERREIRA, T. O. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. *Catena*, v. 162, p. 325-332, 2018.

OLIVEIRA, J. B. *Pedologia Aplicada*. 3. ed. Piracicaba-SP: FEALQ, 2008, 592 p.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 57 – 99.

OLIVEIRA, V. P. V. Indicadores biofísicos de desertificação, Cabo verde/África. *Mercator*, v. 10, n. 22, p. 147-168, 2011.

OMM. ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. Geneva, 1989. WMO, technical document, n. 341; WCDP, n. 10. 1989.

OWLIAIE, H. R.; ADHAMI, E.; GHIRI, M. N.; SHAKERI, S. Pedological Investigation of a Litho-Toposequence in a Semi-Arid Region of Southwestern Iran. *Eurasian Soil Science*, v. 51, n. 12, p. 1447-1461, 2018.

PACHECO, A. P.; FREIRE, N. C. F.; BORGES, U. N. A transdisciplinaridade da desertificação. *Geografia (UEL)*, Londrina-PR, n.1, v. 15, p. 40-54, 2006.

PACHECO, J. M. Interações pedogeomorfológicas em bacia de drenagem no semiárido baiano. 133 f. 2017. Tese (Doutorado em Geografia Física) Departamento de Geografia - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

PAIVA, A. Q. Solos carbonático-fosfáticos do Platô de Irecê, BA: gênese, mineralogia e geoquímica. 2010. 184f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. *Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 5, n. 3, p. 1-15, 2011.

PARENTE, H. N.; ANDRADE, A. P. D.; SILVA, D. S. D.; SANTOS, E. M.; ARAUJO, K. D.; PARENTE, M. D. O. M. Influência do pastejo e da precipitação sobre a fenologia de quatro espécies em área de caatinga. *Revista Árvore*, v. 36, n. 3, p. 411-421, 2012.

PEDREIRA, A. J.; ROCHA, A. J. D.; GUIMARÃES, J. T.; BOMFIM, L. F. C.; MORAIS FILHO, J. C. D.; MOTTA, A. C. Projeto Bacia de Irecê. Salvador-BA: CPRM, 1985. 93 p. Relatório da Etapa 1.

PELECH, A. S. Paleorrelevo pleistocênico e estimativas de dissecação vertical e volumétrica para o Holoceno em uma pequena bacia hidrográfica - médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ). *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 7, n. 1-2, p. 6 – 13, 2016.

PENHA, A. E. P. P. O calcário caatinga de Ouro-lândia, Bahia: feições diagnósticas, gênese e evolução de um perfil calcrete. 1994. 114f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 1994.

PENTECOST, A.; VILES, H. A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*, v. 48, n. 3, p. 305-314, 1994.

PEREIRA, I. J. J. F.; NASCIMENTO, F. R. Panorama da desertificação em Chicualacuala, Moçambique (África Austral). *Mercator*, v. 12, n. 29, p. 171-189, 2013.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 7, p. 1179-1184, 1998.

PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S.; TINÔCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica?. *Revista Parcerias Estratégicas*, Brasília-DF, v. 17, p. 87-106, 2012.

PESSENDA, L. C. R.; GOUVEIA, S. E. M.; SOUZA RIBEIRO, A.; DE OLIVEIRA, P. E.; ARAVENA, R. Late Pleistocene and Holocene vegetation changes in northeastern Brazil determined from carbon isotopes and charcoal records in soils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 297, n. 3-4, p. 597-608, 2010.

PESSOA, A. E. S. As ruínas da tradição: a Casa da Torre de Garcia D'Ávila-família e propriedade no Nordeste colonial. 2003. 294 f. Tese (Doutorado em História) – FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.1, n.1, p. 88-102, 2000.

PILÓ, L. B. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. 1998. 276 f. Tese (Doutorado Geografia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

PIRES, A. S. Caracterização e gênese das formações ferríferas do complexo Lagoa do Alegre (BA) com base em estudos geológicos, petrológicos e isotópicos. 2016. 183f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2016.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, v. 50, n. 2-4, p. 91-133, 2003.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. Para Entender a Terra. Trad.: MENEGAT, R.; FERNANDES, P.C.D.; FERNANDES, L. A. D. 4.ed. Porto Alegre: Bookman. 2006. 656 p.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. Atlas do desenvolvimento humano no Brasil: IDHM dos municípios. 2013. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>. Acesso em: 01 dez 2020.

QUEIROZ NETO, J. P. Análise estrutural da cobertura pedológica: uma experiência de ensino e pesquisa. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 15, p. 77-90, 2002.

\_\_\_\_\_. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 3, p. 15-24, 2011.

REHEIS, M. C. Climatic implications of alternating clay and carbonate formation in semiarid soils of south-central Montana. *Quaternary Research*, v. 27, p. 270-282, 1987.

REIS, C.; MENEZES, R. C. L.; SANTOS, F. P.; MIRANDA, D. A.; LOUREIRO, H. S. C.; NEVES, J. P.; VIEIRA, R. Carta Geológica Brejão da Caatinga, Folha SC.24-Y-A-III. Escala 1:100.000. Salvador: CPRM, 2018.

RENGERS, F. K.; TUCKER, G. E. The evolution of gully headcut morphology: a case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, n. 10, p. 1304-1317, 2015.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações. 2. ed. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras, 2011. 206 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 5 ed. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras, 2007. 322 p.

RETALLACK, G. J. Core concepts of paleopedology. *Quaternary International*, v. 51, p. 203-212, 1998.

RIBEIRO, A. D. F.; PEREIRA, C. P.; BRAZ, E.; MAGALHÃES, A. C. F.; CHIODI FILHO, C. Mármore Bege Bahia em Orolândia-Mirangaba-Jacobina, Bahia: geologia, potencialidade e desenvolvimento sustentável. Salvador-BA: CBPM, 2002. 39p. (Série Arquivos Abertos, 17).

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do Solo. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VITAL-TORRADO, P. Pedologia: fundamentos. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012, p. 48-80.

ROBBINS, C. W. The CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system in soils. *Journal of Agronomic Education*, v. 14, n. 1, p. 3-7, 1985.

ROBINS, C. R.; DEURLINGTON, A.; BUCK, B. J.; BROCK-HON, A. L. Micromorphology and formation of pedogenic ooids in calcic soils and petrocalcic horizons. *Geoderma*, v. 251, p. 10-23, 2015.

ROCHA, A. J. D.; PEREIRA, C. P.; SRIVASTAVA, N. K. Carbonatos da Formação Caboclo (Proterozóico Médio) na região de Morro do Chapéu- estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 22, n. 4, p. 389-398, 1992.

RÖMER, W.; KANIG, M.; PFISTERER, U. The influence of lithology on hillslope development in the area of the Jacupiranga Alkaline Complex and its surroundings - São Paulo, Brazil. *Catena*, v. 47, n. 2, p. 151-173, 2002.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. Simulation and the Monte Carlo method. Hoboken: Wiley, 2007.

RUBIO, J. L. Desertification: Definiciones. Marco Conceptual. In: Seminário Desertificación y Cambio Climático. Centro de Investigaciones sobre Desertificación – CIDE/Universidad Internacional Menendez Pelayo (UIMP), C.S.I.C – Valencia. 1995.

RUELLAN, A.; DOSSO, M.; FRITSCH, E. L'analyse structurale de la couverture pédologique. *Science du Sol*, v. 27, p. 319-334, 1989.

RUELLAN, A.; NAHON, D.; PAQUET, H.; MILLOT, G. Rôle des encroûtements et epigenies calcaires dans le façonnement du modelé en pays aride. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, v. 30, n. 4, p. 283-288, 1977.

SÁ, I. B.; ANGELOTTI, F. Degradação ambiental e desertificação no semi-árido brasileiro. In: ANGELOTTI, F.; SÁ, I. B.; MENESES, E. A.; PELEGRINO, G. Q. (Eds.). Mudanças climáticas e desertificação no semi-árido brasileiro. Petrolina-PE: EMBRAPA, 2009. p. 53-63.

SÁ, I. B.; CUNHA, T. J. F.; TEIXEIRA, A. D. C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND, M. A. Processos de desertificação no semiárido brasileiro. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. (Eds.).

Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina-PE: Embrapa Semiárido; Campinas-SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2010. p. 125 – 158.

SALES, Marta Celina Linhares. Evolução dos estudos de desertificação no Nordeste brasileiro. *Geusp - Espaço e Tempo*, n. 11, p. 115-126, 2002.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 229-267.

SALOMÃO, F. X. T. Processos erosivos lineares em Bauru-SP: regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural. 1994. 199 f. Tese (Doutorado) USP-FFCL, Departamento de Geografia, São Paulo, 1994

SALVATI, L.; BAJOCOCO, S. Land sensitivity to desertification across Italy: past, present, and future. *Applied Geography*, v. 31, n. 1, p. 223-231, 2011.

SALVATI, L.; MAVRAKIS, A.; COLANTONI, A.; MANCINO, G.; FERRARA, A. Complex Adaptive Systems, soil degradation and land sensitivity to desertification: A multivariate assessment of Italian agro-forest landscape. *Science of the Total Environment*, v. 521, p. 235-245, 2015.

SALVATI, L.; ZITTI, M.; CECCARELLI, T. Integrating economic and environmental indicators in the assessment of desertification risk: A case study. *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 6, n. 1, p. 129-138, 2008.

SALVATI, L.; ZITTI, M.; PERINI, L. Fifty years on: long-term patterns of land sensitivity to desertification in Italy. *Land degradation & development*, v. 27, n. 2, p. 97-107, 2016.

SAMPAIO, A. R.; SANTOS, R. A.; ROCHA, A. J. D.; GUIMARÃES, J. T. Carta Geológica Jacobina, Folha SC.24-Y-C. Escala 1:250.000. Salvador-BA: CPRM, 1998.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. *Revista de Geografia*, v. 22, n. 1, p. 90-112, 2005a.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Propensão à desertificação no semi-árido brasileiro. *Revista de Geografia*, v. 22, n. 2, p. 59-76, 2005b.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SAMPAIO, Y. D. S. B.; VITAL, T.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, G. R. Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003. 196 p.

SAMPAIO, F. J. Geologia, Geocronologia e Paleoclima do Quaternário Continental da Região Sul da Chapada Diamantina-Bahia. 259 f. 2013. Tese (Doutorado em Geologia) Instituto de Geociências - Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2013.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizer in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: Soil Science Society of America, 1980. p.263-310.

SANTOS, E. M. C.; SILVA, O. A. Sisal na Bahia - Brasil. *Mercator*, v. 16, p. 1-13, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ...; CUNHA, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5.ed. Brasília-DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. C.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Quaternary deposits in the Serra da Capivara National Park and surrounding area, southeastern Piauí state, Brazil. *Geologia USP, Série Científica*, v. 12, p. 115-132, 2012.

SANTOS, J. M. Indicadores de desertificação no semiárido brasileiro: o caso de Campo Formoso-Bahia. 2016. 471 f. Tese (Doutorado em Geografia) UFF - Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2016

SANTOS, M. *Metamorfoses do espaço habitado: fundamentos teóricos e metodológicos da geografia*. 5. ed. São Paulo: Editora Hucitec, 2014. 124.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. D.; SANTOS, H. D.; KER, J.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6. ed. Viçosa-MG: SBCS, 2013. 92p.

SANTOS, S. N. A. *Conquista e resistência dos Payayá no Sertão das Jacobinas: Tapuias, Tupi, colonos e missionários (1651-1706)*. 2011. 217 f. Dissertação (Mestrado em História Social) - Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2011.

SANZ, M. E.; ZARZA, AM Alonso; CALVO, J. P. Carbonate pond deposits related to semi-arid alluvial systems: examples from the Tertiary Madrid Basin, Spain. *Sedimentology*, v. 42, n. 3, p. 437-452, 1995.

SARPARAST, M.; OWNEGH, M.; NAJAFINEJAD, A.; SEPEHR, A. An applied statistical method to identify desertification indicators in northeastern Iran. *Geoenvironmental Disasters*, v. 5, n. 1, p. 3, 2018.

SCHAETZL, R. J.; ANDERSON, S. *Soils: Genesis and Geomorphology*. New York: Cambridge University Press, 2005, 817p.

SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). *Soil color*. Special publication 31. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 51-69.

SCHWERTMANN, U.; FANNING, D. S. Iron-manganese concretions in a hydrosequence of soil in loess in Bavaria. *Soil Science Society of America Journal*, n. 40, p. 731-738. 1976.

SEEBER, L.; GORNITZ, V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, v. 92, n. 4, p. 335-367, 1983.

SHANKAR, N.; ACHYUTHAN, H. Genesis of calcic and petrocalcic horizons from Coimbatore, Tamil Nadu: Micromorphology and geochemical studies. *Quaternary International*, v. 175, n. 1, p. 140-154, 2007.

SHINZATO, E. O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação de solos. 1998. 99f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 1998.

SILVA, A. B. Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia. Série Arquivos Abertos, 24. Salvador: CBPM – Companhia Baiana de Produção Mineral. 2006. 46 p.

SILVA, A. J. C. L. P. O supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica. 1994. 127 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SILVA, F. B. R. Solos descarbonatados desenvolvidos sobre calcário Bambuí da região de Irecê, Bahia. 1977. 131f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 1977.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C. D.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; COOPER, M.; CAVASSANI, R. D. S. Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de carste na Serra da Bodoquena, MS. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 6, p. 1464-1480, 2013.

SILVA, P. C. G.; MOURA, M. S. B.; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. D. L.; PEREIRA, L. A.; SÁ, I. B.; ...; GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina-PE: Embrapa Semiárido, 2010. p. 19-48.

SILVA, T. B.; ROCHA, W. J. S. F.; DIAS, A. B. Indicadores socioeconômicos associados ao processo de desertificação na região norte e nordeste do estado da Bahia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal-RN. *Anais...* Natal: INPE, 2009. p. 2341-2348.

SIMPLÍCIO, A. A. F.; COSTA, C. A. G.; NAVARRO-HEVIA, J.; ARAÚJO, J. C. Erosion at hillslope and micro-basin scales in the Gilbués Desertification Region, North-eastern Brazil. *Land Degradation & Development*, p. 1–13, 2020.

SINGH, R. B.; AJAI. A composite method to identify desertification ‘hotspots’ and ‘brightspots’. *Land Degradation & Development*, v. 30, n. 9, p. 1025-1039, 2019.

SIVAKUMAR, M. V. K. Interactions between climate and desertification. *Agricultural and forest meteorology*, v. 142, n. 2-4, p. 143-155, 2007.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. DESERTIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS NA VEGETAÇÃO E SOLOS DO CARIRI PARAIBANO (desertification and its effects over the vegetation and soils of the Cariri region of Paraíba–Brazil). *Mercator*, v. 8, n. 16, p. 217 a 232-217 a 232, 2009.

SOUZA, D. C.; OYAMA, M. D. Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 103, n. 3-4, p. 345-357, 2011.

SOUZA, S. L.; BRITO, P.C.R.; SILVA, R.W.S. Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. Salvador: CBPM, 1993. 22p. (Série Arquivos Abertos 2).

SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 9, p. 2210-2222, 2015.

STOOPS, G. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (Ed.). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 01-13.

STOOPS, G. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons / Soil Science Society of America, 2021. 240 p.

SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 400 p.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J. H.; MATSUI, E. Significados paleoclimáticos e paleoambientais das rochas calcárias da Formação Caatinga (BA) e do Grupo Bauru (MG/SP). *Congresso Brasileiro de Geologia*, 31, 1980, Balneário Camboriú-SC. *Anais...* Balneário Camboriú-SC: SBG, v.1, 1980, p. 607-617.

SUPERINTENDÊNCIA DO VALE DO SÃO FRANCISCO – SUVALE. *Fotografia aéreas*. Foto Índice Q-184. Projeto 0-46B, realizado entre 1948/1953. Escala 1:25.000.

TANDON, S. K.; ANDREWS, J. E. Lithofacies associations and stable isotopes of palustrine and calcrete carbonates: examples from an Indian Maastrichtian regolith. *Sedimentology*, v. 48, n. 2, p. 339-355, 2001.

TANG, J.; TANG, X.; QIN, Y.; HE, Q.; YI, Y.; JI, Z. Karst rocky desertification progress: soil calcium as a possible driving force. *Science of The Total Environment*, v. 649, p. 1250-1259, 2019.

TEBBENS, L.A.; VELDKAMP, A.; WESTERHOFF, W.; KROONENBERG, S.B. Fluvial incision and channel downcutting as a response to Late-glacial and Early Holocene climate change: the lower reach of the River Meuse (Maas), The Netherlands. *Journal of Quaternary Science*, v. 14, n. 1, p. 59–75, 1999.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.) *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília-DF: EMBRAPA. 2017. 574p.

TOKAY, A.; SHORT, D. A. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *Journal of applied meteorology*, v. 35, n. 3, p. 355-371, 1996.

THOMAS, M. F. *Geomorphology in the Tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 460 p.

THOMAS, M. F. Landscape sensitivity to rapid environmental change - a Quaternary perspective with examples from tropical areas. *Catena*, v. 55, n. 2, p. 107-124, 2004.

THOMAS, M. F.; THORP, M. B. Geomorphic response to rapid climatic and hydrologic change during the Late Pleistocene and Early Holocene in the humid and subhumid tropics. *Quaternary Science Reviews*, v. 14, p. 193–207, 1995.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. New York: Wiley, 2002. 352 p.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 97 p.

TSUKAMOTO Y; OHTA T; NOGUCHI H. Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan. In: WALLING, D. E. (Ed.). *Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield*. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences Publication, v. 137, p. 89- 98, 1982.

TUCKER, G. E.; SLINGERLAND, R. Drainage basin responses to climate change. *Water Resources Research*, v. 33, n. 8, p. 2031-2047, 1997.

TUCKER, M. E.; WRIGHT, V. P. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1990. p. 284-313.

UNITED NATIONS. United nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. Final text of the Convention. 1994. 58 p. Disponível em: [https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-01/English\\_0.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-01/English_0.pdf). Acesso em 08 de julho de 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Dados de elevação da Missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30 metros, 2014. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em 18 de março de 2018.

VALADÃO, R. C. *Evolução de longo termo do relevo do Brasil Oriental: desnudação, superfícies de aplanamento e soerguimentos crustais*. 1998. 242 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, v. 63, p. 132–153. 2005.

VANDENBERGHE, J. Timescales, climate and river development. *Quaternary Science Reviews*, v. 14, n. 6, p. 631-638, 1995.

VANDENBERGHE, J.; MADDY, D. The response of river systems to climate change. *Quaternary International*, 79, p. 1-4, 2001.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. Núcleos de Desertificação no Polígono das Secas. *ICB/UFPE*, v. 1, p. 69-73, 1971.

VERDUM, R.; QUEVEDO, D.; ZANINI, L.; CÂNDIDO, L. Desertificação: questionando as bases conceituais, escalas de análise e consequências. *GEOgraphia*, v. 3, n. 6, p. 83-91, 2001.  
VERRECCHIA, E. P.; VERRECCHIA, K. E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research*, v. 64, n. 3a, p. 650-664, 1994.

VIEIRA, M. B. S. (Coor.). Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Eólico Cristal. Salvador-BA: V & S Ambiental. 2011. Relatório 02.

VIEIRA, R. D. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.

VILES, H. A.; PENTECOST, A. Tufa and travertine. In: NASH, D. J.; MCLAREN, S. J. (Eds.) *Geochemical Sediments and Landscapes*. Malden-USA: Blackwell Publishing, 2007, p. 173-199.

VITTE, A. C. Etchplanação dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 16, p. 105-118, 2005.

WANG, S. J.; LIU, Q. M.; ZHANG, D. F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land degradation & development*, v. 15, n. 2, p. 115-121, 2004a.

WANG, X.; AULER, A. S.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H.; CRISTALLI, P. S.; RICHARDS, D. A.; SMART, P. L.; SHEN, C. C. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature*, v. 432, n. 7018, p. 740, 2004b.

WENDT, K. A. Heinrich Stadials recorded in Northeast Brazilian Stalagmites. 2015. 82 p. Thesis (Master of Science) Faculty of University of Minnesota. Saint Paul-Minnesota, 2015.

WILLIAMS, H.; TURNER, F. J.; GILBERT, C. M. Petrografia: uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas. Trad. Rui Ribeiro Franco. São Paulo: Polígono/USP. 1970. 445p.

WILSON, G. A.; KELLY, C. L.; BRIASSOULIS, H.; FERRARA, A.; QUARANTA, G.; ...; JIANG, M.; ZHANG, P. Social memory and the resilience of communities affected by land degradation. *Land Degradation & Development*, v. 28, n.2, p. 383-400, 2016.

WINSLOW, M.; SHAPIRO, B. I.; THOMAS, R.; SHETTY, S. V. R. Desertification, drought, poverty and agriculture: research lessons and opportunities. Aleppo-Syria; Patancheru-India; Rome- Italy: ICARDA / ICRISAT / UNCCD, 2004. 46 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p.

WOBUS, C. W.; TUCKER, G. E.; ANDERSON, R. S. Does climate change create distinctive patterns of landscape incision?. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 115, n. F4, 2010.

WRIGHT, V. P. Calcretes. In: NASH, D. J.; MCLAREN, S. J. (Ed.). *Geochemical Sediments and Landscapes*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, p. 10-45. 2007.

WRIGHT, V. P. The significance of needle-fibre calcite in a Lower Carboniferous palaeosol. *Geological Journal*, v. 19, n. 1, p. 23-32, 1984.

WRIGHT, V. P.; PLATT, N. H. Seasonal wetland carbonate sequences and dynamic catenas: a re-appraisal of palustrine limestones. *Sedimentary Geology*, v. 99, n. 2, p. 65-71, 1995.

WRIGHT, V. P.; TUCKER, M. E. Calcretes: an introduction. In: WRIGHT, V. P.; TUCKER, M. E. (Ed.). *Calcretes. The international association of Sedimentologists*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, v. 2, p. 1-22. 1991.

XU, D.; YOU, X.; XIA, C. Assessing the spatial-temporal pattern and evolution of areas sensitive to land desertification in North China. *Ecological indicators*, v. 97, p. 150-158, 2019.

YAALON, D. H. Soils in the Mediterranean region: what makes them different? *Catena*, v. 28, n. 3-4, p. 157-169. 1997.

YAN, Y.; DAI, Q.; JIN, L.; WANG, X. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China. *Catena*, v. 174, p. 48-58, 2019.

YANG, X.; ZHOU, Z.; LI, B. Dynamic analyzing in karst rocky desertification based on the landscape model spatial pattern. *Procedia Environmental Sciences*, v. 10, p. 2083-2090, 2011.

YUAN, D. X. Rock desertification in the subtropical karst of south China. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, v. 108, p. 81-90, 1997.

ZAMANIAN, K.; PUSTOVOYTOV, K.; KUZYAKOV, Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Science Reviews*, v. 157, p. 1-17, 2016.

ZANARDO, A.; MARQUES JR., J. Conceitos Básicos em mineralogia do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F (Ed.). *Química e mineralogia do solo: parte I - conceitos básicos*. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 73-150.

ZHANG, J.; DAI, M.; WANG, L.; SU, W. Household livelihood change under the rocky desertification control project in karst areas, Southwest China. *Land Use Policy*, v. 56, p. 8-15, 2016.

ZINCK J. A. The Geomorphic landscape: the attributes of geofoms. In: ZINCK J. A.; METTERNICHT, G.; BOCCO, G.; DEL VALLE, H. F. (Ed.). *Geopedology*. London: Springer. 2016. p. 127-163.

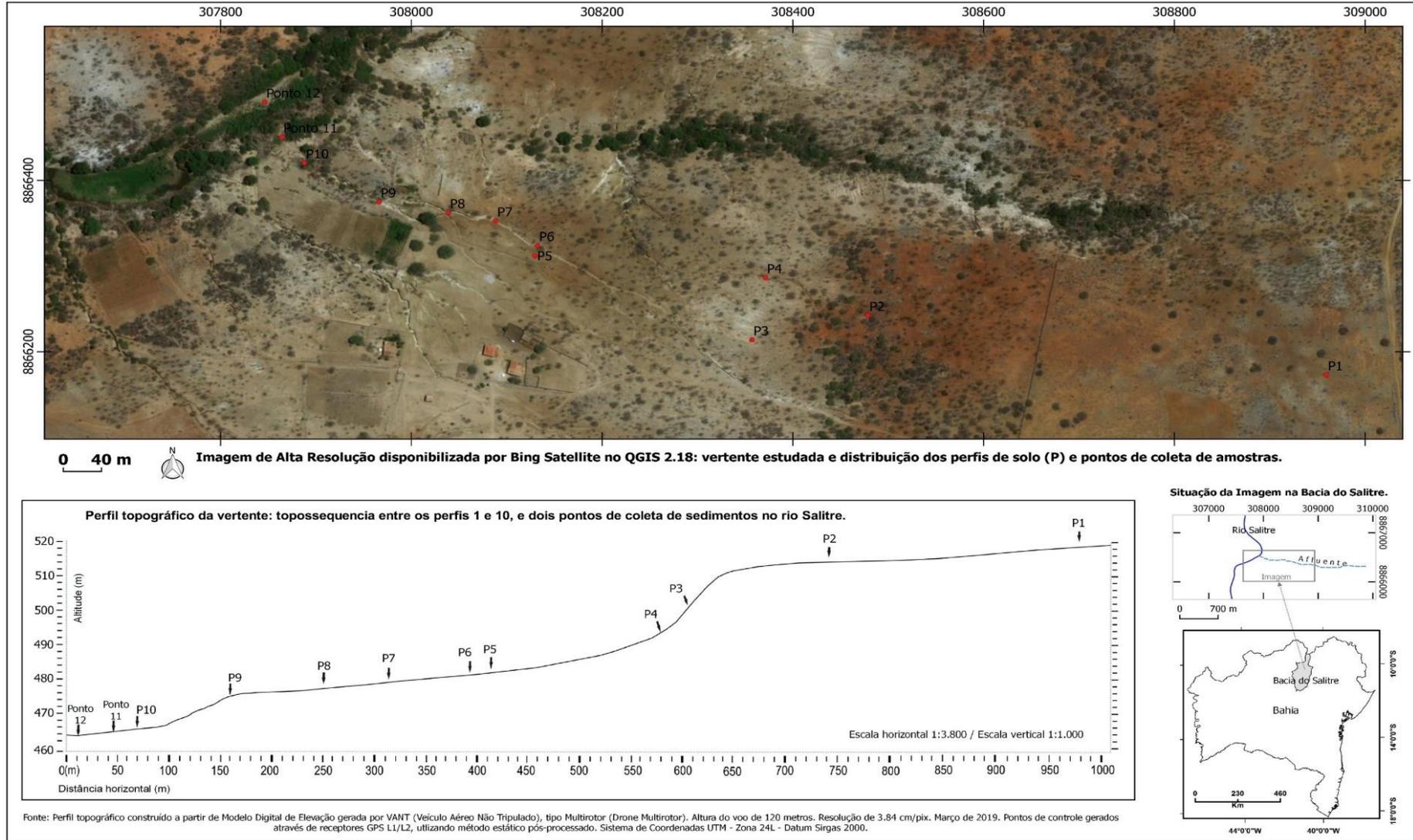
ZUCCA, C.; PREVITALI, F.; MADRAU, S.; KADIR, S.; EREN, M.; AKÇA, E.; KAPUR, S. Microstructure and palygorskite neoformation in pedogenic calcretes of central Morocco. *Catena*, v. 168, p. 141-152, 2017.

ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. B. Feições erosivas na bacia do córrego do Espraiado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972-2002. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 2, p. 414-425, 2007.

ZWEIG, R.; FILIN, S.; AVNI, Y.; SAGY, A.; MUSHKIN, A. Land degradation and gully development in arid environments deduced by mezzo-and micro-scale 3-D quantification—The Negev Highlands as a case study. *Journal of Arid Environments*, v. 153, p. 52-65, 2018.

## APÊNDICE A - Recorte espacial de imagem de satélite e perfil topográfico

Recorte espacial da vertente estudada, ao norte da comunidade de Taboá, zona rural do município de Campo Formoso - Bahia, apresentando imagem de alta resolução com pontos representando a distribuição dos perfis de solo (P).



## APÊNDICE B - Descrição morfológica dos perfis de solo

<b>Perfil:</b>	<b>1 - P1</b>
Data:	29/04/2019.
Classificação:	CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático típico.
Localização:	Coordenadas UTM: Zona 24L 310037 E / 8861954 N. Margem da estrada para L. Branca.
Situação e declive:	Visualização de perfil em área de escavação para retirada de materiais utilizados na terraplanagem de estradas. Platô com 1% de declividade.
Elevação (altitude):	520 metros.
Litologia:	Calcretes.
Formação geológica:	Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.
Pedregosidade:	Não pedregosa nos horizontes A e B. Extremamente pedregosa no C.
Rochosidade:	Não Rochosa.
Relevo local:	Plano.
Relevo regional:	Platô carbonático do Médio Salitre (Superfície “Velhas”).
Erosão:	Não aparente.
Drenagem:	Imperfeitamente drenado.
Vegetação primária:	Caatinga hiperxerófila.
Uso atual:	Caprinocultura extensiva.
Clima:	BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.
Descrito e coletado:	Márcio Lima Rios.

### Descrição Morfológica

Ak	0 – 04cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/4, seca); franco-argiloarenosa; fraca pequena e muito pequena granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
Bik1	04 – 22cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/6, seca); franco-argiloarenosa; forte média e grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e muito pegajosa; transição plana e clara.
Bik2	22–42 (40-44) cm, bruno-amarelado (10YR 5/8, úmida) e amarelo-brunado (10YR 6/8, seca); franco-argiloarenosa; forte média e grande blocos subangulares; dura, friável, plástica e muito pegajosa; transição ondulada e abrupta.
C $\bar{$ km	42 – 85 <sup>+</sup> cm, coloração variegada, composta de bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida), bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, úmida) e branco (10YR 8/1); franco-argiloarenosa; moderada pequena e muito pequena blocos subangulares e granulares; ligeiramente dura, friável, plástica e muito pegajosa.

**Raízes:** Poucas; finas e médias nos horizontes A e B (quantidade reduz em profundidade). Não aparente no C.

#### Observações:

**Ak** - Muitos nódulos pretos e arredondados na massa do solo (efervescência forte após adição de gotas de peróxido de hidrogênio). Nódulos carbonáticos não aparecem, mas há efervescência ligeira, quase imperceptível, após gotas de HCl 10%.

**Bik1** - Muitos nódulos pretos e arredondados, com relativo brilho, na massa do solo. Características vérticas (pequenos fendilhamentos verticais). Nódulos carbonáticos não aparecem, e há efervescência ligeira, quase imperceptível, após gotas de HCl em amostras de solo. Ocorre efluorescência (muito pouca) de carbonato de cálcio, como revestimentos nas estruturas, com aspecto pulverulento e coloração branca.

**Bik2** - Muitos nódulos pretos e arredondados, com relativo brilho, na massa do solo. Características vérticas (pequenos fendilhamentos verticais). Presença pouca (5 a 15% do volume do solo) de nódulos carbonáticos isolados na massa do solo, de cor branca, macios e medindo em torno de 3mm. Ocorre efluorescências de carbonato de cálcio, como revestimentos nas estruturas e filamentos ramificados, com aspecto pulverulento e coloração branca (maior quantidade em relação ao horizonte acima). Efervescência forte após gotas de HCl em amostras de solo.

**C $\bar{$ km** - Representa um horizonte petrocálcico, composto por nódulos e concreções carbonáticas coalescidas e extremamente cimentadas, além de clastos carbonáticos amalgamados, regularmente distribuídas no horizonte (em quantidade dominante – acima de 85% do volume total dos materiais) com continuidade na paisagem. A continuidade foi visualizada a partir de escavação realizada para retirada de materiais (extração de terra) para terraplanagem em estrada vicinal. As concreções e clastos carbonáticos possuem cor esbranquiçada por fora e interior cinza escuro, com forte efervescência em HCl 10%. Possuem forma diversificada com tamanhos que variam de 1 a 30 cm. Este horizonte C $\bar{$ km reduz significativamente a drenagem do perfil. Em alguns pontos desta continuidade a profundidade do topo do horizonte petrocálcico ultrapassa 50cm, mas inferior a 60cm.

**Perfil:** 2 - P2

Data: 29/09/2018.

Classificação: CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico leptofragmentário.

Localização: Coordenadas UTM: Zona 24L 308478 E / 8866243 N. Próximo ao cemitério da Taboa.

Situação e declive: Abertura de trincheira próximo à borda no platô, com 1,5% de declividade.

Elevação (altitude): 515 metros.

Litologia: Arenito carbonatado.

Formação geológica: Formação Caatinga.

Pedregosidade: Pedregosa (3 a 15% da superfície coberta por calhaus e matacões).

Rochosidade: Não rochosa.

Relevo local: Plano.

Relevo regional: Platô carbonático do Médio Salitre (Superfície “Velhas”).

Erosão: Erosão hídrica laminar moderada. Ocorrência de erosão eólica.

Drenagem: Bem drenado.

Vegetação primária: Caatinga hiperxerófila.

Uso atual: Caprinocultura extensiva.

Clima: BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.

Descrito e coletado: Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

Ak	0 – 04 cm, vermelho-escuro (10R 3/6, úmida) e vermelho (10R 4/8, seca); franco-argiloarenosa; fraca pequena e muito pequena blocos subangulares; macia, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
Bik1	04 – 35 cm, vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4, úmida) e vermelho acinzentado (4/6 10R, seca); franco-argiloarenosa; moderada média e grande blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
Bik2	35 – 65 cm, vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4, úmida) e vermelho acinzentado (4/6 10R, seca); franco-argiloarenosa; moderada média e grande blocos subangulares; dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa.

**Raízes:** Poucas, finas e médias nos horizontes Ak e Bik1. Raras, finas e médias no horizonte Bik2.

#### Observações:

Presença de nódulos pretos e arredondados, com relativo brilho, na massa do solo (efervescência forte após adição de gotas de peróxido de hidrogênio), medindo entre 0,5 e 2 mm. Não há presença de nódulos carbonáticos e as amostras de solo não apresentaram efervescência após gotas de HCl 10%. Os cascalhos e calhaus da superfície e na massa do solo, possuem natureza variada (silicáticos e carbonáticos) com formas e tamanhos bastante diversificados. Na base do perfil há grandes fragmentos (matacões) de arenitos arredondados e em “placas” alongadas, que não apresentaram efervescência após gotas de HCl 10%.

A análise do Equivalente de Carbonato de Cálcio confirma o caráter hipocarbonático das amostras de solo, isto é, presença de CaCO<sub>3</sub> equivalente igual ou superior a 50 g kg<sup>-1</sup> e inferior a 150 g kg<sup>-1</sup> de solo (SANTOS et al., 2018).

**Perfil:** 3 - P3

Data: 10/10/2018

Classificação: NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico.

Localização: Coordenadas UTM: Zona 24L, 308357 E / 8866215 N. Proximidades (ao oeste) do cemitério da Taboa

Situação e declive: Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 135 cm, localizado no terço superior da encosta, com 29% de declividade. Área degradada com esparsa caatinga secundária, predominantemente faveleiras (*Cnidoscolus quercifolius*).

Elevação (altitude): 500 metros

Litologia: Calcretes

Formação geológica: Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.

Pedregosidade: Ligeiramente pedregosa a muito pedregosa

Rochosidade: Não rochosa

Relevo local: Forte ondulado em vertente com morfologia convexa.

Relevo regional: Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).

Erosão: Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.

Drenagem: Moderadamente drenado

Vegetação primária: Caatinga hiperxerófila.

Uso atual: Caprinocultura extensiva.

Clima: BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano

Descrito e coletado: Márcio Lima Rios

#### Descrição Morfológica

C $\bar{k}$ 1	0 – 40 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/4, seca); franco; moderada pequena e média granular e blocos subangulares; muito dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
C $\bar{k}$ 2	40–90 (85-95)cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/3, seca); francosiltosa; forte pequena blocos angulares e subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e difusa.
2Cr $\bar{k}$ 1	90 – 135 <sup>+</sup> cm, bruno muito claro acinzentado (10YR 7/3, úmida) e bruno muito claro acinzentado (10YR 8/2, seca), mosqueado comum médio distinto amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida); francosiltosa; forte pequena e média blocos angulares e subangulares; muito dura, firme, plástica e pegajosa.

**Raízes:** Poucas, médias no horizonte C $\bar{k}$ 1. Não aparente nos outros horizontes.

#### Observações:

Perfil truncado pela erosão dos horizontes superficiais. Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% em todos os horizontes. Trata-se de “horizontes cálcicos”, gerados a partir de materiais altamente calcíticos.

**C $\bar{k}$ 1** - Ocorre eflorescências de carbonato de cálcio (pequena quantidade), preenchendo poros. Também há presença frequente (15 a 40% do volume) de nódulos e concreções de CaCO<sub>3</sub> (esféricos e irregulares, com tamanho > 0,5 cm), alguns apresentando cimentação aparente e reversível. Este horizonte é muito pedregoso (presença de calhaus, principalmente carbonáticos, ocupando 15 a 50% da massa do solo). As estruturas granulares presentes são extremamente duras. Aparenta ser material coluvial.

**C $\bar{k}$ 2** - Ocorre eflorescências de carbonato de cálcio (pequena quantidade), preenchendo poros. Também há presença de muitos nódulos e concreções de CaCO<sub>3</sub> (esféricos e irregulares, com tamanho > 0,5 cm), alguns apresentando cimentação aparente e reversível (em maior quantidade do que o apresentado no horizonte anterior). Quando os nódulos são quebrados expõem material preto no interior. Foram encontrados fragmentos de gastrópodes. Este horizonte é ligeiramente pedregoso (presença de calhaus, principalmente carbonáticos, ocupando 1 a 3% da massa do solo). Representa horizonte transicional entre C $\bar{k}$ 1 e 2Cr $\bar{k}$ 1, com características mais próximas do primeiro. Presença de fragmentos de gastrópodes.

**2Cr $\bar{k}$ 1** - Apresenta material saprolítico, aparentemente cimentado e com rigidez reversível sob umedecimento com água. Constitui material saprolito (r) proveniente de um calcrete maciço intemperizado. Possui mosqueado branco, bege, marrom e pequenos pontos pretos (nódulos, possivelmente ferro-manganesianos).

**Perfil:** 4 - P4

Data: 10/10/2018.

Classificação: NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico típico.

Localização: Coordenadas UTM: Zona 24L, 308394 E / 8866282 N.

Situação e declive: Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 160 cm, localizado no terço superior da encosta, com 23 % de declividade. Área degradada com esparsa caatinga secundária, predominantemente faveleiras (*Cnidocolus quercifolius*).

Elevação (altitude): 495 metros.

Litologia: Calcretes na base e colúvios.

Formação geológica: Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.

Pedregosidade: Muito pedregosa na massa do solo e superfície.

Rochosidade: Não rochosa.

Relevo local: Forte ondulado em morfologia côncava, localizado a aproximadamente 620 metros do rio Salitre.

Relevo regional: Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).

Erosão: Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.

Drenagem: Bem drenado.

Vegetação primária: Caatinga hiperxerófila.

Uso atual: Caprinocultura extensiva.

Clima: BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.

Descrito e coletado: Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

C $\bar{k}$ 1	0 – 15 cm, bruno-forte (7,5YR 4/6, úmida) e amarelo-brunado (10YR 6/6, seca); francoargilosa; moderada pequena e média granulares e blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição ondulada e gradual.
C $\bar{k}$ 2	15 – 80 cm, bruno-forte (7,5YR 5/6, úmida) e amarelo (10YR 7/6, seca); francoargilosa; moderada pequena e média granulares e blocos subangulares; dura, friável e firme, ligeiramente plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
C $\bar{k}$ 3	80 – 160 <sup>+</sup> cm, com de fundo bruno-forte (7,5YR 5/6, úmida) e amarelo (10YR 7/6, seca), mosqueado pouco médio distinto bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2); francoargilosa; moderada pequena e média granulares e blocos subangulares; dura, friável a firme, ligeiramente plástica e pegajosa.

**Raízes:** Poucas, finas e médias nos horizontes C $\bar{k}$ 1 e C $\bar{k}$ 2. Não aparente no C $\bar{k}$ 3.

#### Observações:

Perfil truncado pela erosão do horizonte superficial. São horizontes com baixo grau de desenvolvimento e gerados sobre material coluvial. Trata-se de “horizontes cálcicos”, formados sobre materiais altamente calcíticos. Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% em todos os horizontes.

**C $\bar{k}$ 1** - Ocorre eflorescências de carbonato de cálcio (como revestimentos nas estruturas – de cor branca) e presença de pedregosidade com calhaus e silicáticos e carbonáticos. Existência de pequenas rachaduras verticais (fendilhamentos).

**C $\bar{k}$ 2** - Ocorre eflorescências de carbonato de cálcio (como revestimentos nas estruturas – de cor branca) em quantidade maior que o horizonte subjacente. Há nódulos e concreções carbonáticas (frequentes/brancos/pequenos/duros/esféricos e irregulares) e, também pedregosidade com calhaus silicáticos e carbonáticos. Foi verificado algumas estruturas (peds) esféricas muito duras, possivelmente formadas por bioturbação. Existência de pequenas rachaduras verticais (fendilhamentos). Presença de fragmentos de gastrópodes.

**C $\bar{k}$ 3** - Ocorre eflorescências de carbonato de cálcio (como revestimentos nas estruturas – de cor branca) presença de nódulos e concreções carbonáticas (muito frequentes/brancos a cremes/pequenos/duros/esféricos e irregulares) e, também pedregosidade com calhaus silicáticos e carbonáticos.

**Perfil:** 5 - P5  
**Data:** 11/10/2018.  
**Classificação:** CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico  
**Localização:** Coordenadas UTM: Zona 24L, 308136 E / 8866323 N.  
**Situação e declive:** Abertura de trincheira com profundidade de 90cm, localizado no terço médio da encosta com 6% de declividade. Área degradada com baixa cobertura vegetal e solo exposto.  
**Elevação (altitude):** 479,5 metros.  
**Litologia:** Calcretes.  
**Formação geológica:** Formação Caatinga – Entre o plioceno e o início do quaternário.  
**Pedregosidade:** Ligeiramente pedregosa.  
**Rochosidade:** Não rochosa.  
**Relevo local:** Suave ondulado. Declividade de 6%. Localizado a 360 metros do rio Salitre.  
**Relevo regional:** Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).  
**Erosão:** Erosão hídrica laminar avançada; ocorrência de erosão eólica.  
**Drenagem:** Bem drenado.  
**Vegetação primária:** Caatinga hiperxerófila.  
**Uso atual:** Caprinocultura extensiva.  
**Clima:** BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.  
**Descrito e coletado:** Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

Ak	0 – 04 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno (10YR 5/3, seca); francoargilosa; fraca pequena granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
Bi $\bar{k}$	04 – 45 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno (10YR 5/3, seca); francoargilosa; moderada pequena média e grande granular e blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
BC $\bar{k}$	45 – 90 <sup>+</sup> cm, bruno amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno amarelado (10YR 5/4, seca); francoargilosa; moderada média e grande blocos subangulares; muito dura, friável, muito plástica e muito pegajosa.

**Raízes:** Poucas, finas e muito finas no horizonte Ak, poucas e médias no Bi $\bar{k}$ . Ausente no BC $\bar{k}$ .

#### Observações:

Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% apenas nos horizontes Bi $\bar{k}$  e BC $\bar{k}$ . Não foi perceptível efervescência no horizonte A.

**Ak** – Material predominantemente solto e pequenos agregados ligeiramente duros. Possui pequenos nódulos pretos no tamanho areia de natureza possivelmente ferro-manganesianos (muito pouco/pequeno/duro/irregular/preto), e também pequenos (tamanho areia) fragmentos de material branco/carbonático (muito pouco).

**Bi $\bar{k}$**  - Possui eflorescência de CaCO<sub>3</sub> (como revestimentos nas estruturas – de cor branca) e nódulos e concreções carbonáticas (poucos/pequenos/duros/esféricos e irregulares/ brancos). Também possui pequenos nódulos pretos no tamanho areia de natureza possivelmente ferro-manganesianos (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos/preto) e a presença de fragmentos de gastrópodes. horizonte ligeiramente pedregoso (menos de 1% de calhaus) constituída por materiais carbonáticos e silicáticos, além de cascalhos. Existência de pequenas rachaduras verticais (fendilhamentos).

**BC $\bar{k}$**  – Possui nódulos e concreções de CaCO<sub>3</sub> em maior tamanho e quantidade (frequentes/pequenos/duros/esféricos e irregulares/ brancos) e nódulos pretos de natureza possivelmente ferro-manganesianos (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos/preto). Neste mesmo horizonte há cascalhos não carbonáticos em pequena quantidade. Existência de pequenas rachaduras verticais (fendilhamentos). Também se verificou a presença de fragmentos de gastrópodes.

<b>Perfil:</b>	<b>6 - P6</b>
Data:	11/10/2018
Classificação:	NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico.
Localização:	Coordenadas UTM: Zona 24L, 308133 E / 8866324 N.
Situação e declive:	Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 80cm, localizado no terço médio da encosta, com 8,6 % de declividade. Área degradada com esparsas espécies da caatinga (faveleiras).
Elevação (altitude):	479 metros.
Litologia:	Calcretes.
Formação geológica:	Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.
Pedregosidade:	Extremamente pedregosa na superfície.
Rochosidade:	Não rochosa.
Relevo local:	Ondulado. Declividade de 8,6%. Localizado a 360 metros do rio Salitre.
Relevo regional:	Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).
Erosão:	Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.
Drenagem:	Moderadamente drenado.
Vegetação primária:	Caatinga hiperxerófila.
Uso atual:	Caprinocultura extensiva.
Clima:	BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.
Descrito e coletado:	Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

C $\bar{K}$ 1	0 – 05 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca); franco; fraca pequena blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
2C $\bar{K}$ 2	05 – 80 <sup>+</sup> cm, cor de fundo branco (10YR 8/1, úmida) e branco (10YR 8/1, seca), mosqueado pouco médio difuso com bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, úmida); francosiltosa; moderada pequena média e grande blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa.

**Raízes:** poucas, finas no horizonte C $\bar{K}$ 1 e médias no 2C $\bar{K}$ 2.

#### Observações:

Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% em todos os horizontes. Trata-se de “horizontes cálcicos”, formados sobre materiais altamente calcíticos.

**C $\bar{K}$ 1** - Possui nódulos e concreções carbonáticas (poucos/pequenos/duros/esféricos e irregulares/ brancos) e pequenos nódulos pretos (efervescência forte com peróxido de hidrogênio) no tamanho areia de natureza possivelmente manganésiana (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos/preto). A pedregosidade é constituída por calhaus carbonáticos e silicáticos, além de cascalhos.

**2C $\bar{K}$ 2** - Constitui aspecto saprolítico, que foi interpretado como um calcrete pulverulento com parte constituindo agregados relativamente coesos (pode ser quebrado com as mãos). O material possui 4 cores, sendo o branco (cor de fundo) com aspecto pulverulento, e os mosqueados são: marrom, bege e cinza esverdeado. Ainda ocorre pouca quantidade dos nódulos e concreções em cor preta (efervescência muito forte com peróxido de hidrogênio/20 volumes) possivelmente manganês, e marrom escuro (não reagem com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), possivelmente ferro.

Foi registrado acumulação de areia no fundo da voçoroca. A distância entre o P5 e P6 é de 9 m com diferença altimétrica de 45 cm na superfície.

**Perfil:** 7 - P7

Data: 11/10/2018

Classificação: NEOSSOLO REGOLITICO Eutrófico típico.

Localização: Coordenadas UTM: Zona 24L, 308089 E / 8866353 N

Situação e declive: Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 130cm, localizado no terço médio da encosta, com 8,2 % de declividade. Área degradada com esparsas espécies da caatinga (faveleiras).

Elevação (altitude): 477 metros

Litologia: Calcretes

Formação geológica: Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.

Pedregosidade: Extremamente pedregosa na superfície.

Rochosidade: Não rochosa

Relevo Local: Ondulado. Declividade de 8,2%. Localizado a 300 metros do rio Salitre.

Relevo regional: Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).

Erosão: Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.

Drenagem: Moderadamente drenado

Vegetação primária: Caatinga hiperxerófila.

Uso atual: Caprinocultura extensiva

Clima: BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano

Descrito e coletado: Márcio Lima Rios

#### Descrição Morfológica

Ck1	0 – 40 cm, cor de bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca), mosqueado com bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, úmida); franco; moderada pequena média grande blocos subangulares; muito dura, friável, muito plástica e pegajosa; transição ondulada (35 a 55 cm) e gradual.
Ck2	40–95 (80 a 110) cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca), mosqueado com bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, úmida); franco; moderada pequena média e blocos subangulares; muito dura, friável, muito plástica e pegajosa; transição ondulada e abrupta.
2Ck3	95 – 130+ cm, cor de fundo branco (10YR 8/1, úmido e seco), mosqueado com bruno amarelado (10YR 5/6, úmida), bruno muito claro-acinzentado (10 YR 8/2, úmida), cinzento-claro (5Y 7/2); francosiltosa; moderada média grande e muito grande blocos subangulares e angulares; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Raízes:** raras, médias no horizonte Ck2 e médias no 2Ck3, poucas e finas no horizonte Ck1.

#### Observações:

Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% em todos os horizontes. Trata-se de “horizontes cálcicos”, formados sobre materiais altamente calcíticos.

**Ck1** - Possui nódulos e concreções carbonáticas (frequentemente/pequenas/duras e macias/esféricas e irregulares/brancas) e pequenos nódulos pretos (efervescência forte com peróxido de hidrogênio) de natureza possivelmente ferro-manganesianas (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos/pretos). A pedregosidade (muito pedregosa) é constituída por calhaus carbonáticos e silicáticos, além de cascalhos.

**Ck2** – Constitui material solto, com pedregosidade alta (extremamente pedregosa), constituída calhaus com até 15 cm de diâmetro, carbonáticos e silicáticos, além de cascalhos. Possui nódulos e concreções carbonáticas (pouco/pequenas/duras/esféricas e irregulares/brancas) e pequenos nódulos pretos (efervescência forte com peróxido de hidrogênio) de natureza possivelmente ferro-manganesianas (frequente/pequenos/duros/irregulares e esféricos/pretos). Ocorre nódulos marrons que não reagiram com peróxido de hidrogênio.

**2Ck3** – Constitui aspecto saprolítico, que foi interpretado como um calcrete pulverulento com parte constituído agregados relativamente coesos (pode ser quebrado com as mãos). O material possui 4 cores, sendo o branco (cor de fundo) com aspecto pulverulento, e os mosqueados são: marrom, bege e cinza esverdeado. Ainda ocorre pouca quantidade dos nódulos e concreções em cor preta (reagem com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), possivelmente manganês, e marrom escuro (não reagem com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) possivelmente ferro.

**Perfil:** 8 - P8  
**Data:** 23/10/2018.  
**Classificação:** CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático saprolítico.  
**Localização:** Coordenadas UTM: Zona 24L, 308037 E / 8866365 N.  
**Situação e declive:** Perfil em voçoroca com profundidade de 270cm, localizado no terço médio da encosta, com 4 % de declividade. Área degradada com esparsas espécies da caatinga (faveleiras).  
**Elevação (altitude):** 475,5 metros.  
**Litologia:** Calcretes.  
**Formação geológica:** Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.  
**Pedregosidade:** Muito pedregosa na superfície.  
**Rochosidade:** Não rochosa.  
**Relevo local:** Suave ondulado. Declividade de 4%. Localizado a 250 metros do rio Salitre.  
**Relevo regional:** Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).  
**Erosão:** Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.  
**Drenagem:** Bem drenado.  
**Vegetação primária:** Caatinga hiperxerófila.  
**Uso atual:** Caprinocultura extensiva.  
**Clima:** BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.  
**Descrito e coletado:** Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

Bi $\bar{k}$	0 – 40 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/4, seca); franco-argiloarenosa; moderada pequena média blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada (35 a 45 cm) e clara.
C $\bar{k}$ 1	40 – 120 cm, cor de fundo bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca), mosqueado com bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, úmida); francoargilosa; moderada pequena média grande blocos subangulares e angulares; muito dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição ondulada (110 a 130 cm) e clara.
C $\bar{k}$ 2	120–200 (170-230) cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, seca) mosqueado com bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, úmida); franco; moderada pequena média e blocos subangulares; muito dura, friável, muito plástica e pegajosa; transição irregular e abrupta.
2C $\bar{k}$ 3	200 – 270 <sup>+</sup> cm, cor de fundo branco (10YR 8/1, úmido e seco), mosqueado com bruno amarelado (10YR 5/6, úmida), bruno muito claro-acinzentado (10 YR 8/2, úmida), cinzento-oliváceo-claro (5Y 6/2); francosiltosa; moderada pequena média e grande blocos angulares e subangulares; muito dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Raízes:** comuns, finas médias grossas e muito grossas nos horizontes Bi $\bar{k}$  e C $\bar{k}$ 1, raras média grossas e muito grossas no C $\bar{k}$ 2. Não aparente no 2C $\bar{k}$ 3.

#### Observações:

Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% nos horizontes C $\bar{k}$ 1, C $\bar{k}$ 2 e 2C $\bar{k}$ 3, e efervescência forte no Bi $\bar{k}$ . Apresenta perfil truncado pela erosão, com remoção de horizonte A e parte do horizonte B.

**Bi $\bar{k}$**  - Ligeiramente pedregoso (menos de 1% da massa do solo composto por calhaus) e presença de pequenos cascalhos - entre 2 e 5mm (quartzosos e carbonáticos). Possui nódulos e concreções carbonáticas (muito pouca/pequenas/duras/esféricas e irregulares/brancas). Existência de pequenas rachaduras verticais.

**C $\bar{k}$ 1** - Moderadamente pedregoso (entre 1 e 3% da massa do solo composto por calhaus) e presença de cascalhos - entre 2 e 20 mm (quartzosos e carbonáticos). Possui nódulos e concreções carbonáticas (frequentes/pequenas/duras e macias/esféricas e irregulares/brancas) e pequenos nódulos pretos de natureza possivelmente ferro-manganesianas (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos/pretos). Existência de pequenas rachaduras verticais (fendilhamentos). Presença de fragmentos de gastrópodes.

**C $\bar{k}$ 2** – As mesmas características apresentadas no horizonte anterior, com diferença na quantidade e tamanho dos nódulos e concreções carbonáticas (muito frequentes/pequenas e grandes/duras e macias/esféricas e irregulares/brancas). Na base do C $\bar{k}$ 2 possui calhaus e matacões (extremamente pedregoso) e numa distância de 6 metros à montante desse perfil, há pacote com pedregosidade mais espessa na base.

**2C $\bar{k}$ 3** – Constitui aspecto saprolítico, que foi interpretado como um calcrete pulverulento com parte constituindo agregados relativamente coesos (pode ser quebrado com as mãos). O material possui 4 cores, sendo o branco com aspecto pulverulento, e os mosqueados são: marrom, bege e cinza esverdeado. Ainda ocorre pouca quantidade dos nódulos e concreções em cor preta (reage com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e marrom escuro (não reage com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

<b>Perfil:</b>	<b>9 - P9</b>
Data:	23/10/2018.
Classificação:	NEOSSOLO LITÓLICO Carbonático típico.
Localização:	Coordenadas UTM: Zona 24L, 307967 E / 8866376 N.
Situação e declive:	Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 125 cm, localizado no terço médio da encosta, com 14,5 % de declividade. Área degradada com esparsas espécies da caatinga (faveleiras).
Elevação (altitude):	472 metros.
Litologia:	Tufos calcários e calcretes
Formação geológica:	Formação Caatinga. Entre o plioceno e o início do quaternário.
Pedregosidade:	Muito pedregosa na superfície e na massa do solo.
Rochosidade:	Moderadamente rochosa.
Relevo local:	Ondulado. Declividade de 14,5%. Localizado a 180 metros do rio Salitre.
Relevo regional:	Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).
Erosão:	Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes. Ocorrência de erosão eólica.
Drenagem:	Bem drenado.
Vegetação primária:	Caatinga hiperxerófila.
Uso atual:	Caprinocultura extensiva.
Clima:	BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.
Descrito e coletado:	Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

C $\bar{k}$ 1	0 – 25 (18-32) cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca); franco; moderada pequena média grande granular e blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição irregular e clara.
C $\bar{k}$ 2	25 – 60 (50-70) cm, bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seca); franco; moderada pequena média e grande blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.
2C $\bar{k}$ 3	55 – 125 <sup>+</sup> cm, cor de fundo branco (10YR 8/1, úmido e seco), mosqueado com bruno muito claro-acinzentado (10 YR 8/2, úmida), cinzento-oliváceo-claro (5Y 6/2, úmido); francosiltosa; moderada pequena média grande e muito grande blocos subangulares e angulares; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Raízes:** Comuns com todos os tamanhos no C $\bar{k}$ 1. Raras, finas médias e grossas no horizonte C $\bar{k}$ 2 e 2C $\bar{k}$ 3.

#### Observações:

Perfil truncado pela erosão dos horizontes superficiais. Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% em todos os horizontes. Trata-se de “horizontes calcícos”, formados sobre materiais altamente calcícos.

**C $\bar{k}$ 1** – Horizonte muito pedregoso (calhaus e matacões ocupando entre 15 e 50%) constituído de material carbonático de baixa densidade com presença de fósseis vegetais (folhas e raízes), interpretados como fragmentos de Tufos Calcários (Travertinos Meteógenos). Possui eflorescência de carbonato de cálcio nos agregados e clastos (revestimentos de cor branca). Possui nódulos e concreções carbonáticas (poucas/pequenas/duras e macias/esféricas e irregulares/brancas). Ocorre estrutura (ped) granular esferoidal com diâmetro de 1 cm (possivelmente proveniente de bioturbação), com revestimento de material pulverulento, de cor branca (eflorescência de CaCO<sub>3</sub>). Presença de fragmentos de gastrópodes.

**C $\bar{k}$ 2** - Possui pedregosidade menor que C $\bar{k}$ 1 (pedregosidade diminui em profundidade). Nódulos pretos e marrons não aparentes. Possui eflorescência de carbonato de cálcio nos agregados e clastos (revestimentos de cor branca). Presença de fragmentos de gastrópodes. Possui nódulos e concreções carbonáticas (poucas/pequenas/duras e macias/esféricas e irregulares/brancas). Material e aspecto geral semelhante às características apresentadas no C $\bar{k}$ 1, mas com coloração mais clara.

**2C $\bar{k}$ 3** - Constitui aspecto saprolítico, que foi interpretado como um calcrete pulverulento com parte constituindo agregados relativamente coesos (pode ser quebrado com as mãos). O material com aspecto pulverulento possui cor branca, os mosqueados são bege(creme) e cinza esverdeado. Ocorre pouca quantidade e tamanho muito pequeno de nódulos e concreções em cor preta.

Há acumulação de areia na base da voçoroca.

**Perfil:** **10 - P10**  
**Data:** 24/10/2018.  
**Classificação:** CAMBISSOLO FLÚVICO Carbonático vertissólico.  
**Localização:** Coordenadas UTM: Zona 24L, 307890 E / 8866420 N.  
**Situação e declive:** Visualização de perfil em incisão de voçoroca com profundidade de 50cm, com abertura de mais 40 cm, localizado no terço inferior da encosta (terraço abandonado), com 4 % de declividade. Área de mata ciliar (algaroba e arbustos).  
**Elevação (altitude):** 465 metros.  
**Litologia:** Sedimentos aluvio-coluviais (terraços).  
**Formação geológica:** Sedimentos / Formação Caatinga.  
**Pedregosidade:** Muito pedregoso na superfície do solo.  
**Rochosidade:** Não rochosa.  
**Relevo local:** Suave ondulado. Declividade de 4%. Localizado a 80 metros do talvegue do rio Salitre. Constitui terraço abandonado.  
**Relevo regional:** Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).  
**Erosão:** Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com voçorocas, muito frequentes.  
**Drenagem:** Moderadamente drenado.  
**Vegetação primária:** Mata Ciliar com caatinga hiperxerófila no entrono.  
**Uso atual:** Caprinocultura extensiva.  
**Clima:** BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.  
**Descrito e coletado:** Márcio Lima Rios.

#### Descrição Morfológica

A $\bar{k}$	0 – 15 cm, bruno (10YR 5/3, úmida) e bruno-amarelado-claro (10YR 6/4, seca); franco-argiloarenosa; moderada pequena média grande blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada (entre a profundidade de 13 e 17cm) e clara.
Bi $\bar{k}l$	15 – 45 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/4, seca); francoargilosa; moderada pequena média grande e grande granular e blocos subangulares; muito dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
Bik2	45 – 95 <sup>+</sup> cm, bruno escuro (10YR 3/3, úmida) e bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, seca); franco-argiloarenosa; moderada pequena média e grande laminar e blocos angulares e subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa.

**Raízes:** Comuns, todos os tamanhos em todos os horizontes.

#### Observações:

Efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% nos horizontes A $\bar{k}$  e Bi $\bar{k}l$ . Efervescência não aparente no Bik2.

**A $\bar{k}$**  - Horizonte pedregoso (calhaus silicáticos e carbonáticos) e muitos cascalhos pequenos. Existência de crosta na superfície. Possui nódulos e concreções carbonáticas (pouco/pequenas/duras/esféricas e irregulares/brancas). Existência de rachaduras verticais / fendilhamentos, e nódulos pretos e marrons de natureza possivelmente ferromanganesiana (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos).

**Bi $\bar{k}l$**  - Possui nódulos e concreções carbonáticas (pouco/pequenas/duras/esféricas e irregulares/brancas). Existência de rachaduras verticais / fendilhamentos, e nódulos pretos e marrons de natureza possivelmente ferromanganesiana (poucos/pequenos/duros/irregulares e esféricos). Possui alguns sinais de estrutura laminar, mas com predomínio de blocos subangulares. Verifica-se também a presença de fragmentos de gastrópodes.

**Bik2** - Possui poucos nódulos brancos, pretos, marrons - tamanho areia ou de 3mm (pouco perceptíveis). Aparente processo pedogenético mais avançado. Verifica-se também a presença de fragmentos de gastrópodes (50 cm de profundidade).

Verifica-se acumulação de areia e cascalho no fundo da voçoroca (está próximo a confluência com o rio Salitre).

**Perfil:** **Ponto de coleta de solo 11 - P11 (amostra apenas na camada superficial).**  
**Data:** 24/10/2018.  
**Classificação:** Não classificado  
**Localização:** Coordenadas UTM: Zona 24L, 307880 E / 8866430 N .  
**Situação e declive:** Abertura de trincheira com profundidade de 60 cm na planície de inundação do rio Salitre com 1 % de declividade. Área de mata ciliar (algaroba e arbustos).  
**Elevação (altitude):** 464,5 metros.  
**Litologia:** Sedimentos aluviais.  
**Formação geológica:** Sedimentos aluviais quaternários.  
**Pedregosidade:** Pedregosa na superfície.  
**Rochosidade:** Não rochosa.  
**Relevo local:** Plano. Declividade de 1%. Localizado na planície de inundação do rio Salitre, a 75 metros do talvegue do rio Salitre.  
**Relevo regional:** Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).  
**Erosão:** Erosão hídrica laminar avançada; erosão em sulcos com ravinas, muito frequentes.  
**Drenagem:** Moderadamente drenado.  
**Vegetação primária:** Mata ciliar com caatinga hiperxerófila no entrono.  
**Uso atual:** Caprinocultura extensiva.  
**Clima:** BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.  
**Descrito e coletado:** Márcio Lima Rios.

#### **Descrição Morfológica**

Ck1	0 – 25 cm, bruno (10YR 6/4, úmida) e bruno (10YR 6/4, seca); Francoarenosa; sem unidades estruturais grãos simples; solta, solta, não plástica e não-pegajosa.
-----	--

**Raízes:** Ausente.

#### **Observações:**

Neste ponto há outras camadas, cavou-se trincheira até 60 cm de profundidade, encontrando significativa semelhança com a camada superior (Ck1). Não é objetivo desse trabalho investigar as camadas dos sedimentos fluviais, daí optou-se em não abrir trincheira em maior profundidade para devida descrição e coleta de amostras. Optou-se por analisar apenas a camada superior. Há efervescência muito forte após a adição de gotas de HCl 10% no material geral (sem seleção). Há predominância de materiais carbonáticos (areias, cascalhos, calhaus e matacões carbonáticos) mas com significativa variedade de outros materiais em diversas cores e tamanhos, típicos de sedimentos fluviais.

<b>Perfil:</b>	<b>Ponto de coleta de solo 12 - P12.</b>
Data:	24/10/2018.
Classificação:	Não classificado
Localização:	Coordenadas UTM: Zona 24L, 307846 E / 8866491 N. Localizado na Fazenda Taboa – Propriedade da Senhora Balbina.
Situação e declive:	Retirada superficial de material, localizado no talvegue do rio Salitre (leito seco), com 0% de declividade. Área de mata ciliar (algaroba e arbustos).
Elevação (altitude):	463,5 metros.
Litologia:	Sedimentos aluviais.
Formação geológica:	Sedimentos aluviais quaternários
Pedregosidade:	Não pedregosa.
Rochosidade:	Não rochosa.
Relevo local:	Plano. Declividade de 0%. Localizado no talvegue do rio Salitre.
Relevo regional:	Depressão de fundo de vale no médio curso da bacia do Salitre (porção central do platô carbonático).
Erosão:	Não aparente.
Drenagem:	Muito mal drenado.
Vegetação primária:	Mata ciliar com caatinga hiperxerófila no entrono.
Uso atual:	Caprinocultura extensiva.
Clima:	BSh, Semiárido, com índices de chuva inferiores a 500 mm/ano.
Descrito e coletado:	Márcio Lima Rios.

#### **Descrição Morfológica**

Ck1	0 – 15 cm, bruno-claro-acinzentado (10YR 6/3, úmida) e bruno muito claro-acinzentado (10YR 7/3, seca); franco-argilosiltosa; forte muito grande laminar e angular; extremamente dura, firme, muito plástica e muito pegajosa.
-----	---

**Raízes:** Ausente.

**Observações:**

Não foi aberto perfil nesse local, apenas coletou-se amostra superficial (15 cm). Nesse local o material possui significativa profundidade, a julgar pelas rachaduras verticais / fendilhamentos que atingem 100 cm (profundidade limite usando régua de medição) e abertura de 5 cm, em média. Trata-se de material siltoso a argiloso de acumulação fluvial, em estado bastante ressecado, corresponde aos últimos materiais depositados no talvegue do rio Salitre. Nesse local ocorre encharcamento anual (rio sem fluxo), durante os curtos períodos de chuva.

## APÊNDICE C - Descrição micromorfológica

Quadro com descrição micromorfológica: lâminas extraídas de alguns perfis de solo na topossequência

Perfil/ Horiz.	Agregação	Porosidade	Distribuição relativa- G/F	Grossos (G)			Finos (F)				Matéria Orgânica	Feições Pedológicas
				Composição	Tamanho / Frequência	Forma	Natureza	Cor	Limpidez	b-fábrica		
P1 Bik2	Granular; não acomodados; Bloco subangular; parcialmente acomodados.	Empilhamento complexo; planares, canais, câmaras e cavidades.	Enáulica fina, espaçamento duplo; Porfírica aberta.	Fragmento lítico carbonático e outros; grãos de quartzo.	AF e AM / Frequente	Subangular; sub-arredondado; angular.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn; preenchimentos com calcita; moldic voids.
P2 Bik2	Granular; blocos subangulares; moderadamente separados.	Empilhamento complexo; canais, fissuras, câmaras e cavidades	Enáulica fina, espaçamento simples	Fragmentos líticos diversos; grãos de quartzo.	AF e AM / Dominante	Subangular; sub-arredondado; angular.	Argilas oxídicas	Vermelho	Pontilhada e salpicada	Indiferenciada e grano-estriada	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn; revestimentos de argilas em quartzo.
P3 Ck1	Bloco subangular; granular; fracamente separados.	Canais, câmaras, cavidades e fissuras; Empilhamento complexo.	Porfírica aberta; enáulica fina; espaçamentos duplos	Fragmento lítico carbonático; gr. de quartzo.	AMF, AF, AM e AG / Frequente	Subangular; sub-arredondados; angular.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; revestimento de calcita; preenchimento por calcita fibrosa-acicular.
P3 Ck2	Bloco subangular; granular; fracamente separados.	Canais, câmaras, cavidades e fissuras; Empilhamento complexo.	Porfírica aberta; enáulica fina; espaçamentos duplos	Fragmento lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM e AG / Frequente	Subangular; sub-arredondado; angular.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; revestimento de calcita; preenchimento por calcita fibrosa-acicular.
P3 Ck3	Bloco subangular; acomodados; maciça.	Planares, fissuras, cavidades, câmaras e canais.	Porfírica aberta	Grãos de quartzo	AF e AM / Muito Baixa	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-amarelado claro	Salpicada	Cristalítica calcítica	Não identificada	Nódulos de Fe/Mn; preenchimento por calcita; revestimento de calcita; hiporevestimento de Fe.
P4 Ck1	Microestrutura incipiente: bloco subangular; granular; fracamente separados.	Canais, câmaras, fissuras e cavidades.	Porfírica com espaçamento simples	Fragmento lítico carbonático e outros; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG e Cas / Dominante	Subangular; sub-arredondado; angular.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal; pelota fecal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic void; revestimento de calcita; preenchimento por calcita fibrosa-acicular.
P4 Ck2	Microestrutura incipiente: bloco subangular; fracamente separados.	Planares, fissuras, cavidades e canais.	Porfírica com espaçamento simples; espaçamento duplo	Fragmento lítico carbonático e outros; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG e Cas / Comum	Subangular; sub-arredondado; angular.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic void; revestimento de calcita.
P5 Bik	Blocos subangulares moderadamente separados, moderadamente desenvolvida.	Planares, fissuras, cavidades, câmaras e canais.	Porfírica com espaçamento simples; espaçamento duplo	Fragmento lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG / Frequente	Subangular; sub-arredondado; angular	Carbonática	Bruno-amarelado escuro	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; preenchimento por calcita fibrosa-acicular.
P5 BCK	Blocos subangulares	Planares, fissuras, cavidades, câmaras e canais.	Porfírica com espaçamento simples.	Frag. lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM e AG / Frequente	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic void; preenchimento por calcita.

Continuação...

P6 2Ck2	Microestrutura maciça a cavitária.	Planares, cavidades e fissuras	Porfírica aberta	Fragmento lítico carbonático; poucos grãos de quartzo.	AF e AM / Muito Baixa	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Acinzentado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Não identificada	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic void; preenchimento por calcita; Recristalização (euédricos de calcita).
P8 Ck1	Microestrutura incipiente: cavitária; bloco subangular fracamente separado.	Planares, canais e câmaras.	Porfírica simples.	Fragmento lítico carbonático e outros; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG / Frequente	Subangular; sub-arredondado; angular.	Carbonática	Bruno	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal umificado; pelota fecal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic voids; preenchimentos e revestimentos com calcita.
P8 Ck2	Microestrutura incipiente: bloco subangular fracamente separado; angular, moderadamente separado	Planares, cavidades canais, fissuras e câmaras.	Porfírica simples.	Fragmento lítico carbonático e outros; grãos de quartzo	AMF, AF, AM, AG e AMG / Comum	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal umificado	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; moldic voids; preenchimentos e revestimentos com calcita.
P8 2Ck3	Microestrutura maciça e cavitária; microestrutura incipiente em bloco subangular e granular.	Planares, cavidades e canais; poros de empacotamento complexo.	Porfírica aberta	Fragmento lítico carbonático; poucos grãos de quartzo	AF e AM / Baixa	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Acinzentado	Salpicada	Cristalítica calcítica	Não identificada	Recristalização (euédricos de calcita); revestimentos com calcita; moldic voids, preenchimento com calcita.
P9 Ck1	Microestrutura em blocos subangulares moderadamente a fracamente separados.	Poros planares, canais, cavidades e câmaras.	Porfírica simples.	Fragmento lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG e Cas / Comum	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-Amarelado claro	Salpicada	Cristalítica calcítica	Frag. vegetais, alguns esqueletizados; pelotas fecais	Nódulos de Fe/Mn (raros) e CaCO <sub>3</sub> ; preenchimento por calcita fibrosa-acicular; hipo- revestimento de ferro e argila; Moldic void.
P9 Ck2	Microestrutura cavitária; microest. granular incipiente.	Canais, câmaras cavidades e poros planares.	Porfírica simples.	Fragmento lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF, AM, AG e AMG / Frequente	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-Amarelado claro	Salpicada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal umificado	Nódulos de Fe/Mn (raros) e CaCO <sub>3</sub> ; preenchimento por calcita fibrosa-acicular; hipo- revestimento de ferro; Moldic void.
P9 2Ck3	Microestrutura cavitária; microestrutura em bloco subangular e granular incipientes.	Canais, câmaras e poros planares. Cavidades.	Porfírica espaçamento duplo; espaçamento simples	Fragmento lítico carbonático; grãos de quartzo.	AMF, AF e AM / Baixa	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Acinzentado	Salpicada	Indiferenciada; Cristalítica calcítica.	Fragmento vegetal umificado	Nódulos de Fe/Mn (raros) e CaCO <sub>3</sub> ; preenchimento por calcita fibrosa-acicular; revestimento de calcita; Moldic void.
P10 BiKl	Blocos angulares; blocos subangulares; laminar e granular incipientes.	Canais, planares câmaras e cavidades; Empilhamento complexo.	Enáulica espaçamento duplo; porfírica espaçamento simples.	Frag. lítico carbonático e outros; grãos de quartzo. Resquícios de estratificação em camadas.	AMF, AF, AM e AG / Comum	Subangular; sub-arredondado.	Carbonática	Bruno-amarelado	Salpicada/pontilhada	Cristalítica calcítica	Fragmento vegetal umificado; pelota fecal	Nódulos de Fe/Mn e CaCO <sub>3</sub> ; Moldic void.

Terminologia utilizada de acordo com Stoops (2021); Castro e Cooper (2019).

AMF= Areia Muito Fina (100-50 µm); AF= Areia Fina (200-100 µm); AM=Areia Média (500-200 µm); AG= Areia Grossa (1000-500 µm); AMG= Areia Muito Grossa (2000-1000 µm), de acordo com Bullock et al. (1985); Castro e Cooper (2019). Cas = Cascalho (20.000 – 2.000 µm), de acordo com Castro e Cooper (2019).

**APÊNDICE D - Imagens demonstrativas da relação entre o processo de precipitação/acumulação de  $\text{CaCO}_3$  nos solos carbonáticos e a paisagem em desertificação.**

